



Universidad  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

## Arquitecturas efímeras con herramientas paramétricas

Autor

M<sup>a</sup> Pilar Viamonte Fernández

Director

Zaira Peinado Checa

Escuela de ingeniería y arquitectura (EINA)  
2013

# Arquitecturas efímeras con herramientas paramétricas

## Resumen

La sociedad en la que vivimos se ha convertido en una sociedad digital y esto no podía pasar de largo en la arquitectura. Por ello en los últimos años el diseño arquitectónico ha evolucionado enormemente gracias a la aparición de nuevas herramientas de creación computacional, una de ellas, el diseño paramétrico. Se trata de un mecanismo que posibilita la aplicación de un mismo algoritmo a diferentes tipos de datos, favoreciendo la experimentación formal, ya que genera no sólo la forma de un objeto concreto si no la de todos los objetos posibles que compartan una serie de patrones, pudiendo así seleccionar entre múltiples propuestas la solución más eficiente y adecuada.

Una vez conocidas las generalidades de la arquitectura paramétrica, podemos observar que las ventajas y posibilidades de diseño son infinitas, pero en mayor medida este tipo de técnicas siguen en una fase experimental, lo cual liga a la perfección con el ideal de las arquitecturas efímeras, las cuales pese a su corta duración en el tiempo, siempre han jugado, desde las escenografías barrocas, un papel relevante en el devenir de la arquitectura, debido a que siempre han dado forma a los pensamientos más innovadores de la época y técnicas disponibles más avanzadas, estando siempre, gracias a la brevedad de su existencia, rodeadas del aura de la experimentación.

La modernidad se convirtió en un periodo clave para la evolución y creación de lo efímero haciendo de los pabellones expositivos, laboratorios y manifiestos de sus ideales, a la vez que intentaban dar respuestas a las necesidades de la nueva sociedad, empleando su corta vida para experimentar nuevos territorios. Llegaron a tener tanta transcendencia estas obras, que muchas de las que hoy consideramos ejemplares únicos del siglo pasado, existieron sólo durante unos meses, consiguiendo modificar el curso de la arquitectura con unas pocas imágenes. Por ello se realiza un recorrido para descubrir como los arquitectos más ilustres se han enfrentado a este tipo de situación, haciendo especial hincapié en la concepción proyectual de las obras más actuales del S.XXI.

Con ello no se puede olvidar que la finalidad principal de todo proyecto, es poder llevar las ideas a la práctica y para ello es necesario conocer los métodos de fabricación digital a la vez que saber las diversas estrategias que debemos emplear en el diseño 3D para tener un edificio sostenible y que funcione eficientemente. Además, a partir de la propia experiencia personal se explicaran unas nociones básicas del funcionamiento del programa paramétrico Grasshopper.

Con lo que se puede decir que el objetivo de este trabajo no es otro que intentar investigar y descubrir posibles soluciones futuras con las que conseguir más con menos a la hora de realizar un proyecto arquitectónico.

# Índice

1_ ¿Qué es y cómo surge la arquitectura paramétrica? .....	1
2_ Espacios efímeros, lugares para la experimentación .....	3
3_ Idea y concepción de espacios efímeros mediante la parametrización .....	9
4_ Herramientas y estrategias para el campo de la arquitectura .....	18
5_ Experiencia personal, programa <i>Grasshopper</i> .....	21
6_ Conclusión .....	23
Referencia de imágenes .....	26
Bibliografía .....	31



# Arquitecturas efímeras con herramientas paramétricas

TFG\_ Grado en Estudios de arquitectura\_UNIZAR  
M<sup>a</sup> Pilar Viamonte Fernández



# Arquitecturas efímeras con herramientas paramétricas

M<sup>a</sup> Pilar Viamonte Fernández

## 1\_ ¿Qué es y cómo surge la arquitectura paramétrica?

En los últimos años el diseño arquitectónico ha evolucionado enormemente gracias a la aparición de nuevas herramientas de creación digital, dando lugar a nuevas corrientes de experimentación, una de ellas, el diseño paramétrico. Ha generado una gran controversia entre los arquitectos afines a esta corriente y los detractores debido a la realización de arquitecturas más o menos acertadas, que han llegado a poner en duda la necesidad de este tipo de geometrías. Pero más allá de los prejuicios que pueda suscitar el término de parametricismo, se encuentra una tecnología que usada correctamente puede ayudar a simplificar y a optimizar el trabajo del arquitecto.

La geometría paramétrica se compone de unas complejas acciones que hay que entender para juzgar la viabilidad de sus propuestas, ya que el diseño paramétrico hay que entenderlo ligado a la programación, la fabricación digital y a la simulación del comportamiento. La programación es la que abre las puertas a lo paramétrico, lo cambiante, concentrándose en el proceso metamórfico del objeto en vez de preocuparse exclusivamente en su producción. El diseño paramétrico es una técnica de control que va desde lo local a lo global, en la que la complejidad, las formas amorfas y el caos aparente se consiguen mediante la repetición de reglas más sencillas.

La representación paramétrica, al contrario de lo que ocurre en la representación bidimensional o en los tradicionales modelos tridimensionales, trabaja sobre el proceso de creación en vez de en el resultado final, definiendo todos los factores y operaciones necesarias para su desarrollo, los modelos que se crean no contienen la descripción de las formas que representan sino sus algoritmos de generación, permitiendo

así poder reaccionar y modificar fácilmente la formulación del proyecto ante necesidades o cambios no previstos.

La parametrización es un mecanismo que posibilita la aplicación de un mismo algoritmo a diferentes tipos de datos, favoreciendo la experimentación formal ya que genera no sólo la forma de un objeto concreto si no la de todos los objetos posibles que compartan una serie de patrones, pudiendo así seleccionar entre múltiples propuestas la solución más eficiente y adecuada para resolver el problema o a partir de una misma estructura geométrica poder realizar diferentes formalizaciones para objetos con usos diversos. Un sistema paramétrico permite además la posible introducción de otras variables estructurales, medioambientales o de fabricación, añadiendo un extra de complejidad al modelo, pero con ello es posible conseguir un comportamiento coherente de todo un sistema estructural, la correcta relación de un cerramiento con sus aberturas, que el objeto se adapte a la distancia que debe cubrir sin conocer ésta previamente o que el modelo pueda ser ensamblado sin dificultades.

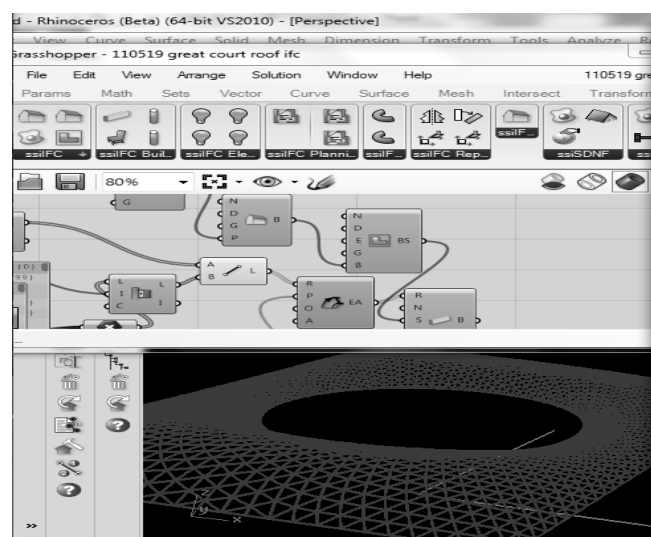
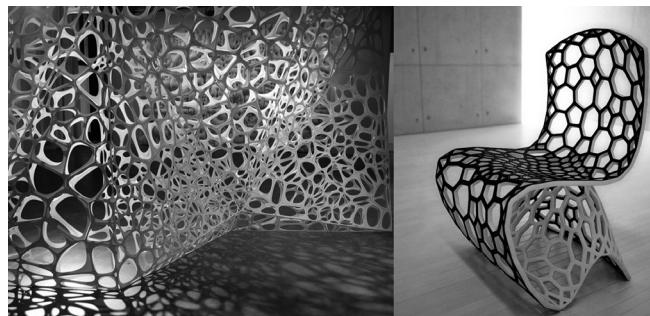
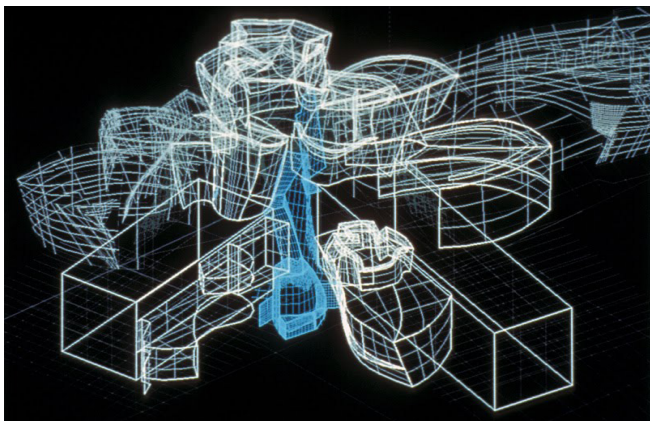


Fig. 1. Visualización de un modelo digital en Grasshopper, Rhinoceros.



Arriba: Fig. 3. Aplicación del mismo algoritmo Voronoi a dos superficies y objetos diferentes.

Izquierda: Fig. 2. Diseño por ordenador del museo Guggenheim Bilbao.

Una vez conocido el fundamento de este tipo de arquitectura puede parecer que se trata de una tipología muy novedosa pero su génesis no es más que un control riguroso de las leyes de la geometría y estas concepciones pueden trasladarnos hasta la ordenación numérica empleada por la antigua Grecia, las estructuras de Nervi, las cúpulas geodésicas de Fuller o las geometrías de Gaudí, es decir, que tradicionalmente estos conceptos habrían sido empleados tradicionalmente para fines técnicos, para pensar soluciones estructurales que debían adaptarse a diferentes contornos de apoyo o adoptar formas irregulares. Resulta curioso que lo que antiguamente se buscaba solucionar y racionalizar con la ayuda de la geometría, sea en la actualidad lo ausente y el mayor motivo de crítica de la arquitectura paramétrica ya que ésta se centra mucho más en la búsqueda de nuevos lenguajes formales que generan prototipos prácticamente irrealizables.

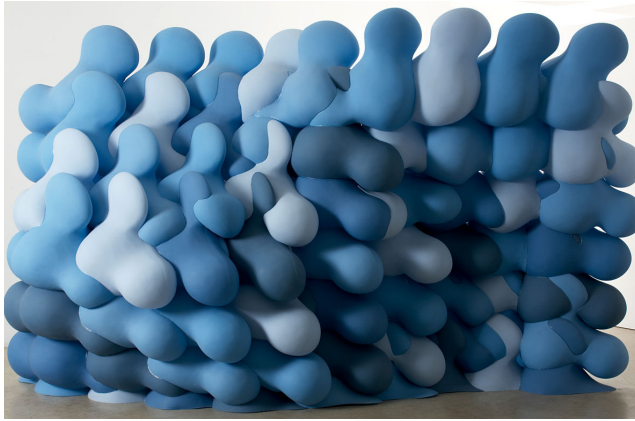
"Vivimos en un mundo que, en virtud de las transformaciones tecnológicas de las últimas décadas se ha vuelto digital" (Negroponte, 1995).

La sociedad en la que vivimos se ha convertido en una sociedad digital y esto no podía pasar de largo por la arquitectura. Hace unos años muchos despachos profesionales decidieron pasarse al formato digital con el objetivo de optimizar tiempo y costes a la hora de realizar sus proyectos, pero lo que empezó como un proceso de modernización de recursos acabó convirtiéndose en una revolución integral que transformó la concepción de la arquitectura. A ello hay que sumar la incorporación por parte de John Holland en los años 70 de la técnica de la inteligencia artificial de los algoritmos genéticos, que se inspiran en la evolución biológica, todo esto formó el caldo de cultivo idóneo para la aparición de la arquitectura paramétrica.

En la década de los 80 ciertas personalidades como Greg Lynn, Peter Eisenman o Michael Graves participaban en las investigaciones de las universidades de la costa este de Estados Unidos, como Harvard o Princeton y allí comenzaron a incorporar el diseño digital a su trabajo, buscando dar una alternativa a la posmodernidad. Aunque no fue hasta 1997 con el Guggenheim de Bilbao cuando Frank Gehry se convirtió en el primer arquitecto en realizar la construcción de un edificio formalmente complejo con tecnología digital.

El parametricismo liderado por la arquitecta Zaha Hadid surgió después del deconstructivismo, ambos estilos poseían una apariencia física desordenada, pero en lugar de la fragmentación y planos inclinados, la arquitectura paramétrica adquirió la expresión formal de una "burbuja viscosa". Llegando a alcanzar el valor de estilo arquitectónico después de que en 2008 Patrik Schumacher (colaborador del estudio de Zaha Hadid) publicara el manifiesto del parametricismo, *Let the style wars begin*, en donde defendía que se trataba de una respuesta estilística a la posmodernidad y la arquitectura actual debía caminar hacia esa dirección.

Después de las muchas ideas inquietantes que se aportan en este artículo surgen la mayoría de los prejuicios adheridos a la arquitectura paramétrica. Muchos de los ejemplos erigidos en este estilo se han convertido en piezas escultóricas, económicamente insostenibles y que solo atraen a ciertos clientes que buscan la ostentación por medio de la forma. Pero cuando se considera el parametricismo como un proceso en vez de como estilo, se convierte en una potente herramienta que permite proyectar edificios mucho más rápido y de una manera eficiente. No todo lo paramétrico tiene que ser una forma, lo necesario es la definición de reglas, variables y prototipos.



Arriba: Fig. 5. Tienda tradicional nómada.

Izquierda: Fig. 4. Greg Lynn. (2008). *The evening Line*.

La realización de los diseños paramétricos actualmente ha sido favorecida por la aparición de máquinas de fabricación digital como las herramientas CNC que han hecho que deje de ser necesaria la estandarización de piezas pudiendo producir objetos a mayor velocidad, en masa y con menor coste.

Después de conocer las ventajas y los orígenes de la arquitectura paramétrica se puede observar que las posibilidades de diseño son infinitas, pero en mayor medida este tipo de técnicas siguen en una fase experimental lo cual liga a la perfección con el ideal de las arquitecturas efímeras, las cuales pese a su corta duración en el tiempo, siempre han jugado, desde las escenografías barrocas, un papel relevante en el devenir de la arquitectura, debido a que siempre han dado forma a los pensamientos más innovadores de la época y técnicas disponibles más avanzadas, estando siempre, gracias a la brevedad de su existencia, rodeadas del aura de la experimentación. Por lo que el uso de herramientas paramétricas puede mejorar enormemente su desarrollo y concepción.

## 2\_ Espacios efímeros, lugares para la experimentación.

Para entender la evolución y significado de estos espacios efímeros entendidos como espacios para la celebración, se va a proceder a realizar un recorrido a lo largo de la historia de ciertos hitos que en su momento lograron cambiar el curso de la arquitectura, muchos de ellos hoy en día desaparecidos. Pero no por ello menos influyentes debido a su fuerte concepto e ideología, basta observar unas simples fotografías para apreciar su inmenso potencial. Todos los ejemplos a desarrollar a continuación, posiblemente, de haberse conocido las herramientas paramétricas en ese momento podrían haber facilitado la concepción, construcción y desarrollo de las piezas que los conformaban ya

que todos ellos poseen un fuerte componente geométrico que fácilmente puede ser trasladado a un algoritmo.

Los primeros ejemplos de arquitectura efímera a los que nos podemos remontar pertenecen prácticamente al comienzo de la existencia del ser humano, el cual para adaptarse a la vida nómada tenía la necesidad de cobijarse en pequeños refugios temporales. Se trataba de una arquitectura breve, ligera y con la capacidad de ser transportada a cualquier otra parte, pero con el transcurso de los siglos fue perdiendo ese valor de protección y alojamiento para dar paso a un tipo de construcción más lúdica y vinculada a la celebración aunque sin abandonar su fugacidad en el tiempo. Por ello el espacio efímero por excelencia es el escenario, un sencillo objeto elevado del suelo capaz de crear un nuevo espacio ganado al terreno existente, destinado a desaparecer tras el fin del evento.

Con la llegada del Renacimiento y el Barroco estos espacios sufrieron grandes transformaciones gracias a la búsqueda de teatralidad, el gusto por la exageración y la multitud de celebraciones políticas o religiosas. Pero el momento auge de la arquitectura efímera no

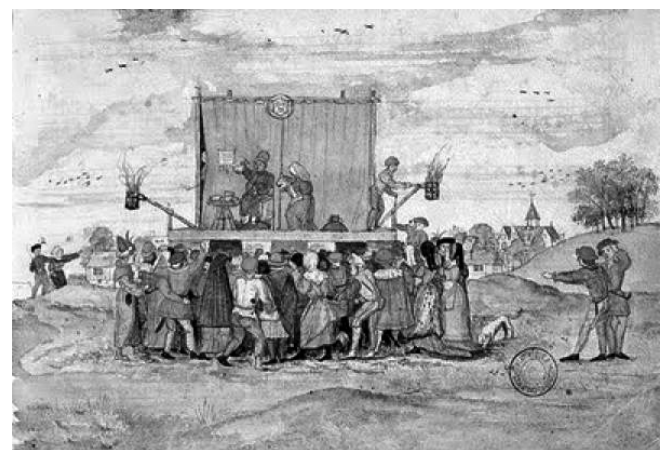
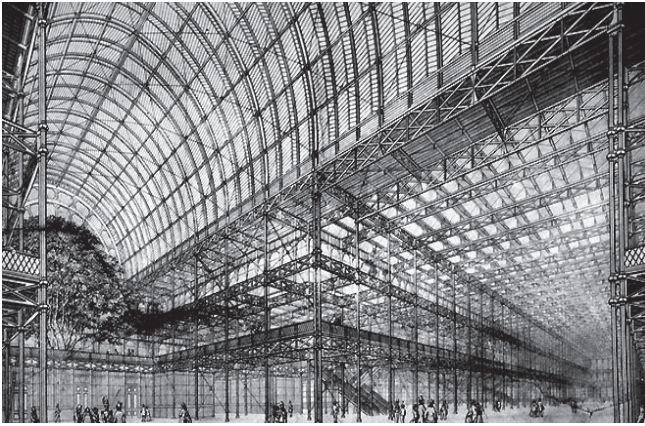


Fig. 6. Teatro ambulante en el periodo del Renacimiento.





Arriba: Fig. 9. George Ferris. (1893). Noria de Chicago.

Izquierda: Fig. 7. Joseph Paxton. (1851). Crystal Palace.

llegaría hasta el siglo XIX con la llegada de las exposiciones universales donde todos los países buscaban vender al resto del mundo una imagen de progreso, innovación y modernidad mediante pabellones temporales que acogían la muestra.

“No debería pues sorprendernos que los pabellones procedan, al menos etimológicamente, de las mariposas. Por su capacidad de no envejecer, de ser forma simultáneamente procreadora y perecedera, pero también por el modo en que se nos suelen aparecer: deteniéndose durante un breve instante para luego desaparecer sin apenas dejar huellas” (Puente, 2000). Palabras del arquitecto Moisés Puente, en su obra Pabellones de exposición.

El *Crystal Palace* para la gran Exposición de Londres de 1851, es el referente inicial por ser el primer pabellón en el que celebración e innovación tecnológica convergen. Su diseñador Joseph Paxton, jardinero de profesión, consiguió construir un edificio ligero, totalmente transparente, un gran espacio diáfano, con una alta luminosidad, de gran tamaño y una altura de 39m. Se trataba de una obra sin precedentes, llevada a cabo gracias al empleo de la modulación y de materiales prefabricados como el acero y el vidrio, reservados únicamente hasta entonces para las empresas de ingeniería. Al acabar la celebración fue desmontado pieza a pieza para ser colocado y ensamblado en un parque del sur de Londres, aunque años más tarde fue destruido en un fatídico incendio.

Podemos ver el impacto que creó dicho edificio en esta exposición mediante las palabras de Daniel Canogar en su libro *Ciudades efímeras: Exposiciones universales espectáculo y tecnología*: “El gran pabellón del *Crystal Palace* simula una ciudad de delirio, puramente regida por las leyes de la exhibición y la espectacularidad. La ciudad de la Exposición es por tanto un

proyecto y anhelo de ciudad transformada y en ello impulsa y dirige el crecimiento y transformación posteriores de las ciudades europeas” (Canogar, 1992).

Tras el triunfo de Inglaterra en esta exposición Francia no quiso quedarse atrás realizando una inmensa exposición universal, con el fin de conmemorar el centenario de la revolución francesa destacando su poder y desarrollo. Tuvo lugar en 1889 en París con la construcción de dos hitos arquitectónicos, la Galería de las Máquinas de Ferdinand Dutert y Victor Contamin. En ella se intentaba evocar la ligereza y grandiosidad del *Crystal Palace* pero huyendo de la imagen de invernadero de éste, para ello su estructura estaba formada por unos monumentales pies

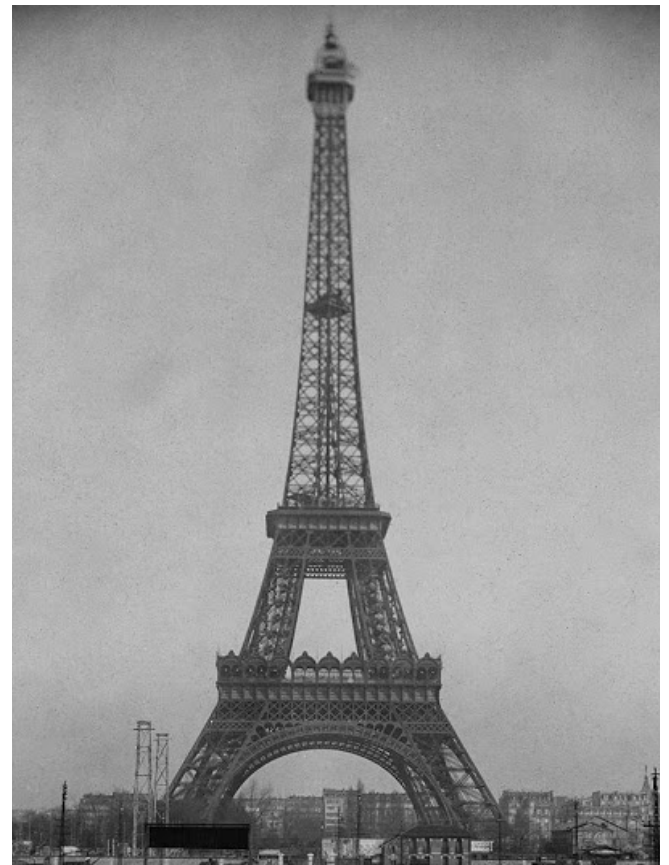
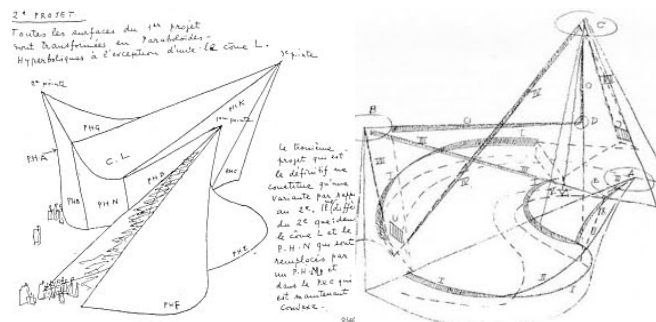


Fig. 8. Gustave Eiffel. (1889). Torre Eiffel.



Arriba: Fig. 11. Le Corbusier. (1958). Bocetos para el Pabellón Phillips de la exposición de Bruselas.

Izquierda: Fig. 10. Corrales y Molezúm. (1958). Pabellón para la exposición de Bruselas.

de acero, consiguiendo que la cubierta alcanzara los 43 metros de altura sin ningún apoyo intermedio. El otro edificio conmemorativo realizado en esta muestra fue la Torre Eiffel creada por Gustave Eiffel, situada en la entrada del recinto, se erigía del terreno mediante una gran estructura de cuatro pilares de hierro que le otorgaban una cierta forma de pirámide. En ella los visitantes podían ser elevados hasta una altura nunca antes alcanzada, 300m, desde donde poder contemplar la inmensidad de la ciudad desde el progreso de la industria, su éxito fue tal que nunca llegó a ser desmontada convirtiéndose hoy en día en el símbolo de la ciudad.

En 1893 al otro lado del Atlántico, quisieron unirse también al éxito de las exposiciones, organizando la Exposición Colombina de Chicago de 1893, en la cual el ingeniero George Ferris ideó una noria surgida de la transformación de una gran rueda hidráulica que permitía que los ciudadanos subieran y bajaran hasta los 80 m de altura girando en torno a un eje.

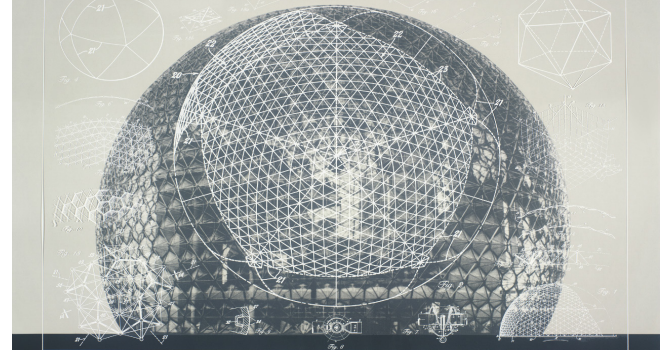
A partir del siglo XX los pabellones de las exposiciones dejarían a un lado la innovación industrial para llegar a convertirse en ejemplos, la mayoría de las veces, de menor tamaño en los que los objetivos de la experimentación serían los materiales y las diversas técnicas constructivas, apartando más a un lado la ingeniería para centrarse en conceptos más arquitectónicos, llegando a convertirse en laboratorios de la forma capaces de cuestionar ciertos postulados tradicionales de la arquitectura, haciéndolos llegar hasta nuestros días. Algunos de los primeros pabellones a destacar tras el fin de la II Guerra Mundial fueron los creados para la exposición de Bruselas de 1958, varios de ellos tomaban la geometría como componente principal en su diseño, con lo que si la tecnología hubiera llegado a estar tan avanzada como en la actualidad hubieran podido ser fácilmente

parametrizados y desarrollados mediante programas como *Grasshopper*.

Uno de los ejemplos es el Pabellón de España de Corrales y Molezúm, el cual además de ser un espacio temporal debía poseer un carácter desmontable para ser trasladado a Madrid cuando la exposición hubiera finalizado, debiendo ser capaz de adaptarse a las diferentes condiciones de ambos emplazamientos, por ello los arquitectos optaron por un novedoso sistema constructivo basado en la prefabricación que agilizaba y facilitaba el montaje. El contorno del pabellón era una línea quebrada formada por la repetición de un elemento constructivo básico: un paraguas hexagonal de 6 metros de diámetro por 6 de alto, que cumplía las exigencias de ser ligero, repetible y autónomo, a la vez que la concatenación de varios de ellos favorecían la elasticidad en la planta. Cada elemento hexagonal estaba formado por una esbelta columna central de acero galvanizado que permitía desalojar a través de ella el agua de lluvia, a la vez que sustentaba una cubierta de paneles de fibras de madera y cemento que se apoyaban en tímpanos triangulares que subdividían el hexágono de la cubierta. Al variar de altura el elemento base, también se permitía la formación de lucernarios, en la diferencia de cota, que introducían luz al interior de la sala. Su interior se percibía como un bosque en el que el conjunto de los esbeltos pilares centrales permitían la concepción de un espacio diáfano, en el que los niveles del suelo definían diversas áreas sin prescindir de la continuidad espacial de todo el pabellón.

Otro ejemplo perteneciente a la misma exposición, sería el pabellón *Phillips* de Le Corbusier e Iannis Xenakis, el cual tenía como objetivo albergar en su interior el Poema Electrónico, para ello el edificio carecía de fachadas al uso o huecos de ventanas. Las paredes estaban formadas por finas láminas de hormigón de 5





Arriba: Fig. 13. Criterios para la creación de una cúpula geodésica.

Izquierda: Fig. 12. Exterior del Pabellón Phillips, exposición de Bruselas.

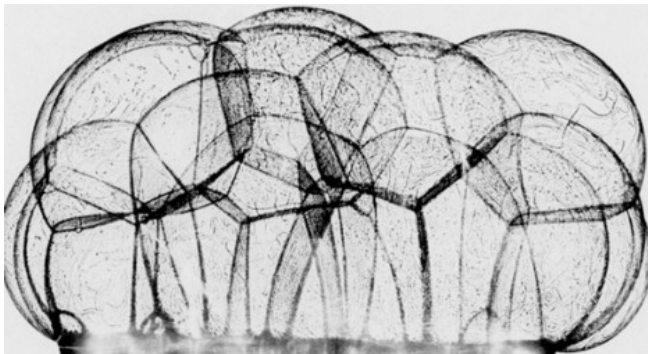
cm de espesor formando superficies regladas, en concreto varios paraboloides hiperbólicos con lados coincidentes entre ellos, trabajando a compresión, gracias a la ayuda de unos cables dispuestos de tal forma que crearan una estructura alámbrica que seguía las directrices propias de cada uno de los paraboloides. Todo ello recubierto por una pintura metalizada capaz de disimular cualquier aspecto constructivo para conseguir una visión de sólido que carecía casi hasta de sombras. Sin embargo en el interior se colocaba al espectador en el centro, para que fuera capaz de contemplar la expansión de los límites de las paredes del pabellón, creando una concepción del espacio ilimitada, quedando desvanecido por la oscuridad. Pero en esta construcción el alarde tecnológico no sólo hacía referencia al complejo método constructivo para la elaboración de las cáscaras de hormigón, sino también en la instalación audiovisual del interior, las superficies cóncavas de los paraboloides servían para proyectar en ellas videos e imágenes y la forma característica del pabellón permitía crear la atmósfera acústica necesaria. El mismo Le Corbusier definía la obra de esta manera: "No voy a hacer un pabellón sino un poema electrónico y un jarrón que contiene el poema de la luz, imagen, ritmo y sonido incorporados en una síntesis orgánica" (Le Corbusier, 1958). Es decir, en esta obra se pretendía que la arquitectura en sí misma fuera utilizada como un elemento para la transmisión de información a través del espacio conformado.

Otra corriente en cuanto a la forma de entender cómo y cuáles deben ser las condiciones de un espacio efímero hace referencia al ámbito de las estructuras ligeras, caracterizadas por su inmaterialidad y la facilidad de montaje que poseen todos sus artefactos. El máximo representante por excelencia es Buckminster Fuller, que ya en la década de 1940 empezó a interesarse por conceptos como la tensegridad, definiéndola en su libro *Synergetics* como: "un prin-

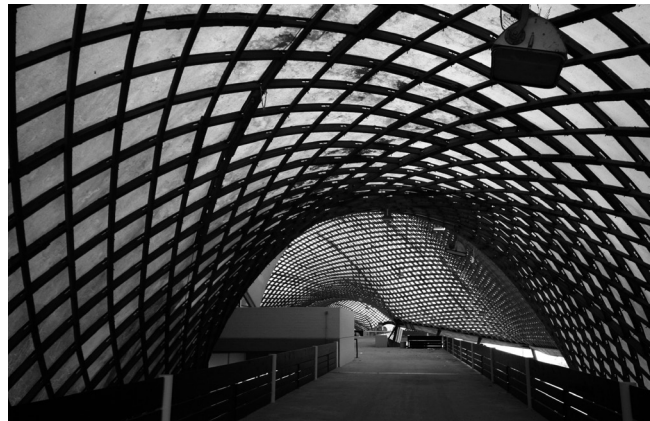
cipio de relación estructural en el cual la forma de la estructura está garantizada por el continuo y finitamente cerrado comportamiento de los elementos traccionados del sistema y no por el discontinuo y localizado comportamiento de sus elementos comprimidos" (Fuller, 1963). Fuller era un visionario, un inventor adelantado a su tiempo y preocupado por el medio ambiente, que estaba convencido de que la geometría natural del universo estaba basada en matrices de tetraedros y con ello, gracias a sus intensas investigaciones en la universidad y a la realización experimentos con sus estudiantes llegó a inventar y patentar en 1947 la cúpula geodésica, la cual se basa en el concepto de tensegridad antes definido y no es más que parte de una esfera geodésica, es decir, un poliedro generado a partir de un icosaedro o un dodecaedro, en el que sus caras pueden ser cualquier polígono, aunque el más común es el triángulo, y los vértices de estos polígonos deben coincidir en su totalidad con la superficie de la esfera.



Fig. 14. Traslado de cúpula geodésica para el cuerpo de marines.



Arriba: Fig. 16. Frei Otto. Cubierta para una nave multiusos en Mannheim.



Derecha: Fig. 15. Frei Otto. Experimentos con pompas de jabón.

Este descubrimiento tuvo un gran éxito, en especial para el desarrollo de distintos tipos estructurales empleados para ser escenario de todo tipo de eventos como el pabellón de Estados Unidos para la exposición de Moscú en 1959 que contenía siete pantallas que proyectaban la película *Glimpses of the USA*. Pero la verdadera culminación de todos sus estudios y patentes no llegaría hasta la Expo de Montreal de 1967 para la que construyó una gigantesca cúpula llamada Biosfera de 76 metros de diámetro por 62 de alto formada por una estructura de acero y celdas de polímero. En su interior albergaba cuatro grandes plataformas divididas en siete niveles y conectadas entre ellas mediante una gran escalera. Con este tipo de edificaciones Fuller llegó a convertirse en pionero en campos relacionados con la eficiencia energética y de materiales, siendo fiel a su lema de "más con menos".

Como se ha podido observar la innovación tecnológica de las décadas de 1950 y 1960 daba cuenta de la búsqueda continua de la inmaterialidad mediante las estructuras de tensgridad ideadas por Buckminster Fuller, pero poco a poco se irían abandonando estos ejemplos para continuar hacia las soluciones constructivas de mallas tensadas de Frei Otto.

El trabajo de este arquitecto partía de una exhaustiva investigación de las formas y estudio de la naturaleza, observaba el comportamiento de las estructuras de las plantas y animales, consiguiendo lograr soluciones estructurales sin programas de computación sofisticados como los que poseemos hoy en día. Buscaba encontrar estructuras livianas y fuertes pero utilizando el mínimo material y el máximo rendimiento. Frei Otto fue el creador del grupo *Biologie und Bauen* (Biología y edificación) en la universidad libre de Berlín lo que le hizo trabajar con varios biólogos, gracias a esta colaboración multidisciplinar llegó a realizar sus experimentos con

burbujas de jabón, ya que éstas adoptan la forma según la cual poseen la superficie mínima y por tratarse de una forma natural poseen automáticamente los esfuerzos mínimos y uniformes. Sin embargo, la verdadera revolución llegó cuando extrapoló estos experimentos a la definición de membranas y mallas tensadas. Todo esto conducía a la liberación de la forma de las arquitecturas de origen temporal, ofreciendo superficies orgánicas y adaptables sin perder la optimización estructural, ligereza y resistencia.

Uno de los primeros lugares en los que puso en práctica el uso de la membrana tensada fue en el pabellón de la República Federal de Alemania en la Expo de Montreal de 1967 la misma en la que Fuller construyó su enorme cúpula geodésica. En esta exposición Otto, recibió el reconocimiento internacional tanto como arquitecto como de ingeniero. Posteriormente sus estudios llegaron al culmen gracias al proyecto del estadio olímpico de Munich de 1972, en él la cubierta está formada por una gran estructura de malla de cables pretensados que se extiende una superficie de 75.000 metros cuadrados, la cual se encuentra suspendida de 12 mástiles de acero articulados y de diferentes alturas, la cubrición de toda la estructura consistía en una lámina de poliéster revestida de PVC de 4 milímetros de espesor.

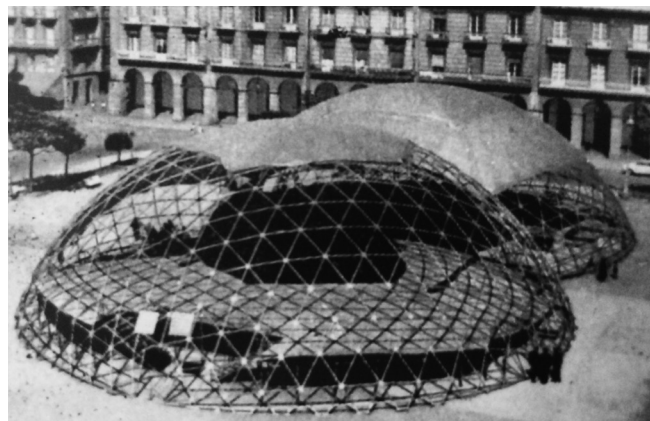
Sus investigaciones no se centraron exclusivamente en el desarrollo de un sistema estructural con un material concreto sino que consiguió extrapolar esta tipología a todo tipo de materiales como por ejemplo la madera, así se puede observar en la cubierta para una nave multiusos en Mannheim en 1975, en ella aplicó sus investigaciones sobre bóvedas de celosía, acuñando el término *grid-shell*, es decir, una cáscara de rejilla compuesta por listones de madera de doble curvatura, que se obtuvo de invertir el modelo de catenaria, optando como solución final dos celosías superpuestas fijadas la una con la





Arriba: Fig. 17. Piñero. (1961). Proyecto ganador para teatro ambulante.

Derecha: Fig. 18. Piñero. (1966). Teatro transportable en La Coruña.



otra. El proyecto tuvo que ser creado y calculado mediante modelos de diferentes escalas ya que por la elevada complejidad de la forma resultó imposible de calcular con los programas informáticos disponibles en ese momento, por lo que es de creer que si Frei Otto tuviera que enfrentarse en la actualidad a un encargo de este tipo no dudaría en afrontarlo con la ayuda de un programa de arquitectura paramétrica porque prácticamente todas las ventajas que éstos ofrecen son los mismos conceptos que él se afanó en conseguir a lo largo de su carrera, se podría decir que su forma de estudio y análisis de la arquitectura podría seguir siendo novedosa hoy en día, ya que ciertas investigaciones defienden la morfogénesis creando diseños a partir del estudio de elementos naturales como posteriormente se podrá observar en algún ejemplo.

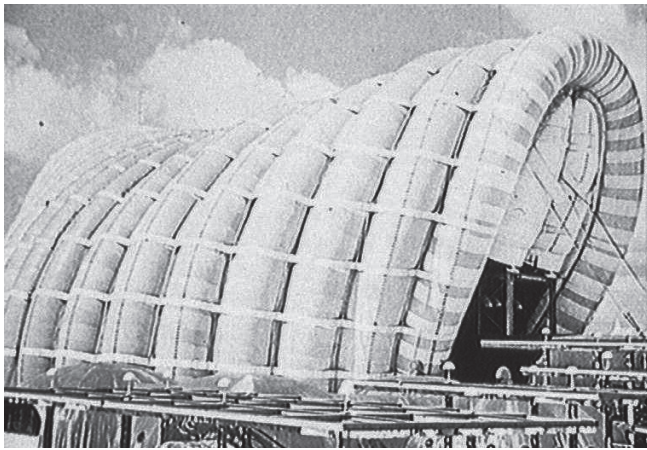
Por otro lado, una de las cualidades intrínsecas de la arquitectura temporal podría ser la capacidad de poder montarse y desmontarse con facilidad para ser trasladada a los sitios en los que su presencia fuera requerida y a pesar del interés por las estructuras ligeras de estos dos últimos arquitectos, resultaba muy complicado, por no decir imposible la movilidad de sus obras. Por ello en algunos puntos del planeta se comenzó a reivindicar la arquitectura nómada, sobre todo en los lugares donde se requerían espacios temporales como escenarios para la realización de cualquier tipo de espectáculo como circos, teatros ambulantes o conciertos. Un pionero en esta tendencia sería el español Emilio Pérez Piñero, que se dio a conocer cuando aún era estudiante de la Escuela de Arquitectura de Madrid tras ganar un concurso para el diseño de un teatro ambulante organizado por la UIA en Londres. En su proyecto llegó a la conclusión de que debía determinar elementos estructurales de montaje rápido y económico, con una estructura que no hubiera que descomponer en piezas para su transporte, para

ello debía resolver el problema geométrico de articulación de barras consiguiendo que todas giraran sin interferir unas con otras, diseñando al fin una estructura reticular liviana que podía fácilmente plegarse y desplegarse gracias a un mecanismo de elevación dispuesto en un camión. Este proyecto nunca llegó a construirse pero le otorgó fama internacional para realizar exposiciones, participar en revistas o relacionarse con arquitectos de prestigio como Félix Candela o Fuller. El mismo Fuller quedó asombrado por su potencial "Piñero realiza estructuras que yo no sabría hacer" (Dalí, 1972). Así relata Dalí un comentario que le dijo Fuller, en una entrevista que le realizaron después de la muerte de Piñero en 1972.

Piñero no solo se conformó con la investigación sino que construyó varias propuestas como el teatro transportable destinado a los Festivales de España en La Coruña en el año 1966, se trataba de dos cúpulas reticulares macladas que más tarde le llevará a idear una cúpula desmontable semiesférica con un sistema constructivo a base de discos de forma hexagonal que se conectan de forma directa, que serviría para albergar proyecciones para Cinerama. Se basaba en la geometría y también en la naturaleza para resolver los problemas estructurales y de montaje intentando obtener soluciones novedosas llegando incluso más allá que grandes maestros como Fuller. El mismo Emilio Pérez Piñero definía su método de trabajo con estas palabras: "la concepción de una estructura reticular es el resultado de una actitud mental ante la naturaleza, que se descompone, analiza y condensa nuevamente en un típico producto manufacturado por la mente del hombre" (Piñero, 1968). Por desgracia falleció muy joven por lo que no se puede saber hasta donde habría podido llegar con sus estructuras nómadas.

Paralelamente a este tipo de arquitectura comenzaron a surgir otro tipo de escenarios





Arriba: Fig. 20. J.M. Prada Poole. (1971). *Instant City*.

Izquierda: Fig. 19. Yutaka Murata. (1970). *Pabellón Fuji*.

que comenzaban a dejar a un lado las formas geométricas y las estructuras ligeras para llegar a soluciones de tipo neumático que suponían el culmen de lo ligero, flexible y transportable. Estas llegaron a ser las protagonistas de la Exposición de Osaka de 1970, destacando los espacios creados por el arquitecto japonés Yutaka Murata como el pabellón Fuji, con dos membranas hinchables que formaban tubos de 360°, o el Teatro flotante que consistía en un edificio hinchable que flotaba por la presencia de 48 sacos de aire los cuales iban variando de presión según la confluencia de espectadores en su interior. Otros ejemplos españoles de este tipo de espacios efímeros fueron los realizados por José Miguel de Prada Poole para la *Instant City* en Ibiza en 1971 en la que además participaron arquitectos como Carlos Ferrater o las cúpulas hinchables para los Encuentros de Pamplona de 1972. Este tipo de espacios para el espectáculo no llegaron a triunfar debido a la complejidad de su diseño y el costoso mantenimiento, además en este punto no interesan en el objeto del trabajo por estar más cercanos a la creación de una burbuja espacial que al rigor geométrico necesario para alcanzar una algoritmo que permita parametrizar este tipo de formas.

Tras este breve transcurso por la evolución de la concepción de espacios efímeros se puede observar que en la actualidad no existen tendencias marcadas para la creación de lo que debe ser un espacio efímero, pero a día de hoy todavía siguen existiendo campos para la investigación arquitectónica, las exposiciones universales u otros organismos de nueva creación, como la convocatoria para el pabellón de la galería *Serpentine* en *Hyde Park*, desde el año 2000, en la cual arte, arquitectura y tecnología se unen, convirtiéndose poco a poco en un éxito popular, debido a que arquitectos de prestigio dejan volar su imaginación erigiendo pabellones con soluciones dispares que van desde

la arquitectura neumática, a planos tensados, pérgolas etéreas, creaciones minimalistas o hasta diseños paramétricos, todos ellos invitando a la reflexión del porvenir arquitectónico. También juegan a favor de la experimentación numerosos laboratorios creados en las universidades de arquitectura como los *Fab Labs* en los que diseño y fabricación digital se unen para la creación de prototipos totalmente novedosos.



Fig. 21. S. Fujimoto. (2013). *Serpentine Gallery*.

### 3\_ Idea y concepción de espacios efímeros mediante la parametrización.

A partir de este momento se procederá a analizar más detenidamente pabellones actuales, concebidos ya en el siglo XXI, en los cuales se explicará el algoritmo usado para su concepción, pudiendo a la vez apreciar las mejoras en cuanto a la rapidez del diseño y la optimización estructural dada gracias a la evolución digital y a los programas de diseño paramétrico como el plugin *Grasshopper* para *Rhinoceros*.

Derecha: Fig. 22. Vista interior del pabellón de Toyo Ito.

Abajo 1: Fig. 23. Montaje de los elementos de la cubierta.

Abajo 2: Fig. 24. Pieza cuadrada de unión entre las vigas de la cubierta y las de la pared.



### Serpentine Pavillion 2002, Toyo Ito, Londres.

Este pabellón supuso la oportunidad de experimentar con algoritmos geométricos para organizar el espacio.

La idea era realizar una caja con unas líneas que se cruzaran al azar el techo creando un armazón estructural sin pilares interiores. El reto fue encontrar una regla (algoritmo) que creara el caos en las líneas pero dentro de un orden interno que permitiera el rápido montaje del pabellón, ya que por su carácter temporal debía construirse en 14 semanas.

El proyecto consigue con un simple algoritmo la racionalización de su geometría, estructura y proceso constructivo, logrando a su vez una estética novedosa.

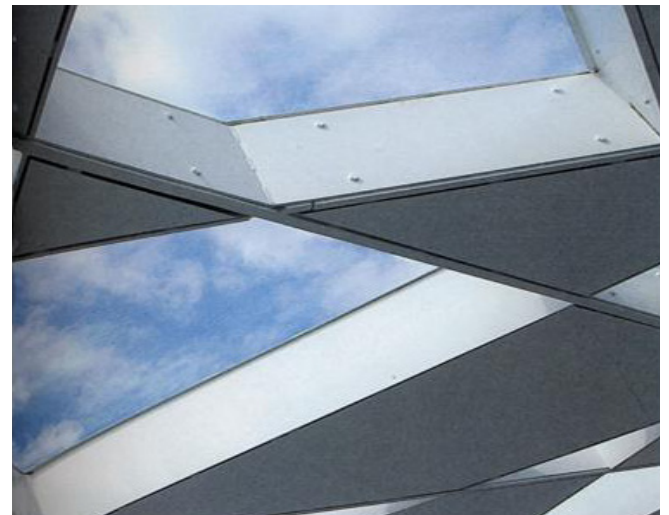
**Punto de partida:** se toma la planta cuadrada del pabellón y se divide con una regla geométrica arbitraria, después de ello se examinan críticamente los diversos resultados producidos por la modificación de dicha regla.

**Estructura:** Al extruir la geometría perpendicularmente las líneas de la cubierta se convierten en barras verticales que actúan como vigas y las líneas de las paredes en barras diagonales que arriostran el plano de la pared. La pieza de conexión entre la pared y la cubierta es una simple placa cuadrada perpendicular al borde de la cubierta. Se produce un engrosamiento progresivo de las vigas desde el centro del pabellón al perímetro, donde las tensiones son más altas.

La estructura se concibe como una serie de paneles que se soportan y estabilizan unos con otros. Cada panel se compone de una viga principal y una serie de elementos de refuerzo soldados en fábrica. Cada conexión entre la viga principal y la siguiente es geoméricamente la misma, simplificando así la fabricación y la

construcción. Los paneles son ensamblados in situ.

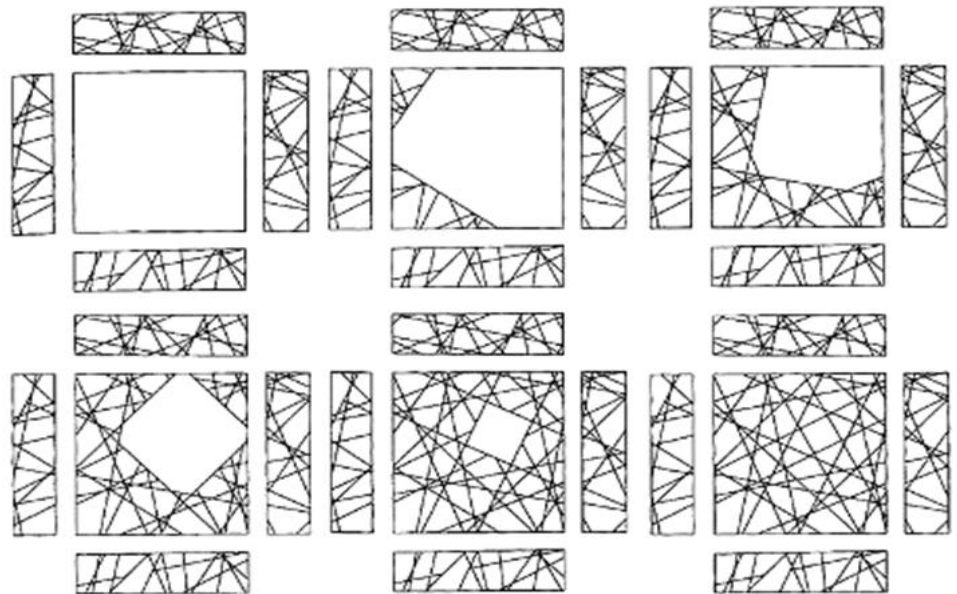
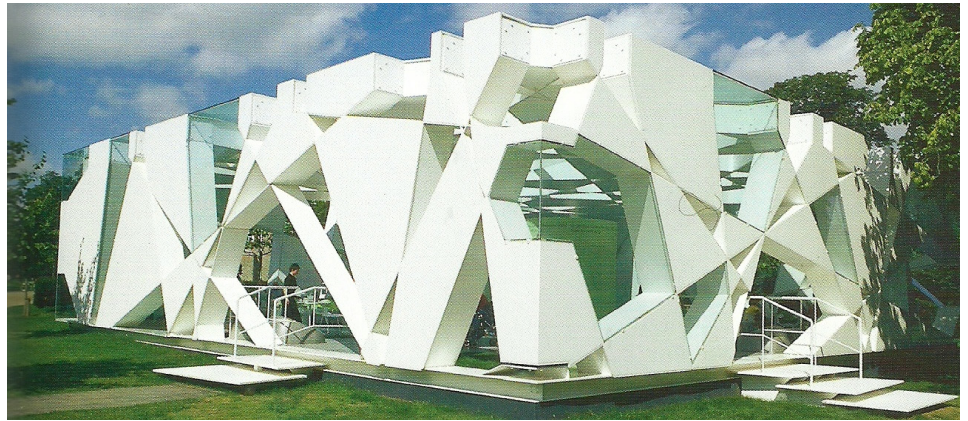
“La dinámica de la línea y la superficie definen las plantillas que crean la arquitectura. En la fabricación de la forma no es sólo ésta la que cuenta sino las reglas y la lógica interior por la cuales se derivan dichos contornos [...] crean diseños, más allá del mero estilo y la moda, para ofrecer interés y belleza.” (Balmond, 1999).



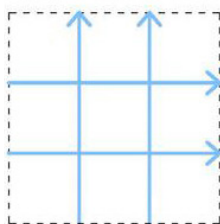


Derecha: Fig. 25. Vista exterior del pabellón de Toyo Ito.

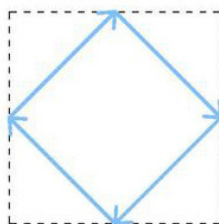
Abajo : Fig. 26. Fases del proceso de montaje



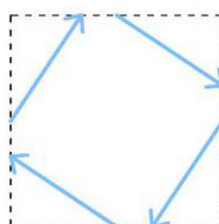
### Definición del proyecto:



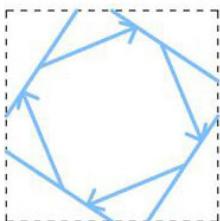
1\_ Disposición típica de malla estructural, vigas perpendiculares



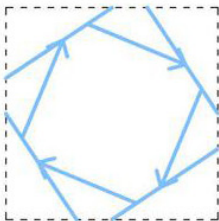
2\_ Conectando dos lados adyacentes del cuadrado base se generan líneas más cortas



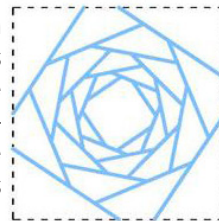
3\_ Para evitar que todos los cuadrados estén inscritos en el cuadrado base se propone la conexión de  $1/2$  a  $1/3$



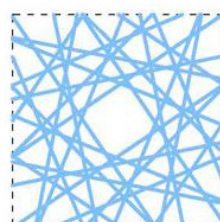
4\_ Repetición sucesiva de la misma regla geométrica en el nuevo cuadrado



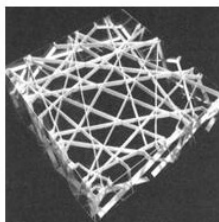
5\_ Se crean nuevas reglas geométricas (de  $1/3$  a  $1/2$ ) la forma se mantiene pero los ángulos varían



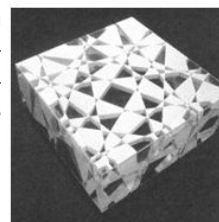
6\_ El algoritmo se repite siete veces generando una sucesión en espiral de cuadrados



7\_ Todas las líneas se extienden formando un patrón infinito que se dobla desde el techo a la pared de la caja



8\_ Las líneas son extruidas perpendicularmente a su superficie 550 mm



9\_ Se reviste el pabellón con aluminio o vidrio siguiendo la regla de hacer opacos todos los espacios colindantes a uno transparente



Derecha: Fig. 27. Vista interior del pabellón de Siza y Souto de Moura.

Abajo 1: Fig. 28. Anclaje de los elementos de cubierta.

Abajo 2: Fig. 29. Mapa de distribución de esfuerzos.



## Serpentine Pavillion 2005, A. Siza, E. Souto de Moura, Londres

Se trata de un pabellón con una estructura versátil de gran amplitud y carencia de obstáculos. Se enfrentan al problema de ¿Cómo construir una cubierta? La solución adoptada es una celosía ondulante fabricada en madera, rellena con paneles de policarbonato, que se asemeja a una "tortuga", como es típico de estos arquitectos el pabellón es muy sensible a su entorno, las paredes parecen inclinarse hacia el exterior, formando parte del paisaje.

A simple vista podría llegar a producirse un enfrentamiento entre los métodos tradicionales de construcción en madera y la evolución de la fabricación con alta tecnología, pero sin embargo el resultado se asemeja más a algo vernáculo y contemporáneo gracias a que la clave se encuentra en la lógica conexión entre los diversos elementos.

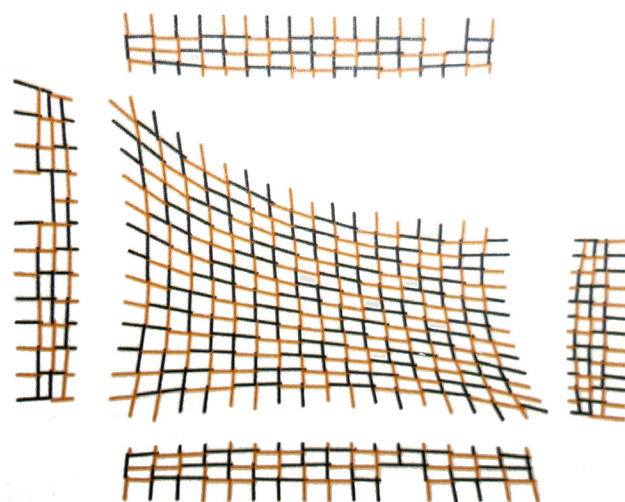
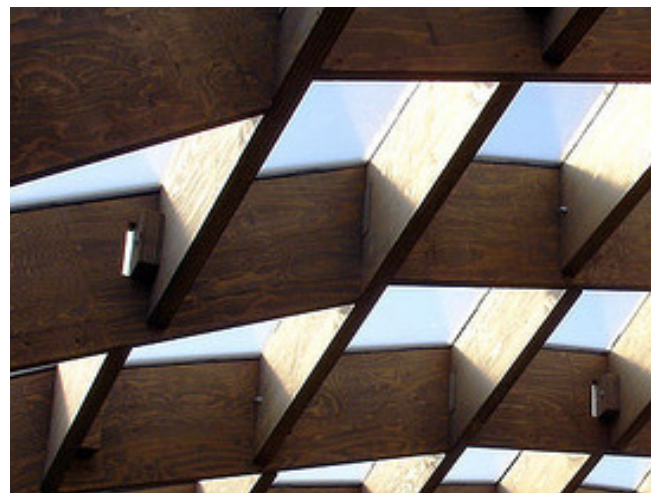
**Punto de partida:** la cuadrícula. La red proporciona la armadura para crear el espacio y controlar la estructura. La red como un "modelo de acción", un mecanismo que se deforma.

**Estructura:** para su correcta desmontabilidad era necesario tener en cuenta una serie de requisitos como crear componentes que pudieran ser transportados por personas, diseñar conexiones simples que aceleraran el montaje o una estructura auto portante durante la obra. Esto es la causa de que todos los elementos posean la misma profundidad y que su borde inferior sea recto.

Matemáticamente codificando las relaciones entre los nodos de la geometría base podemos llegar a describir el comportamiento de cada uno de los componentes (427 en total y todos ellos diferentes), obteniendo cualquier forma automática a la que se adaptaría la geometría de entrada.

Cada elemento tiene una longitud de dos rejillas, los cuales se apoyan mediante el bloqueo de sus extremos con los otros elementos vecinos, al mismo tiempo que en ellos se apoyan los otros.

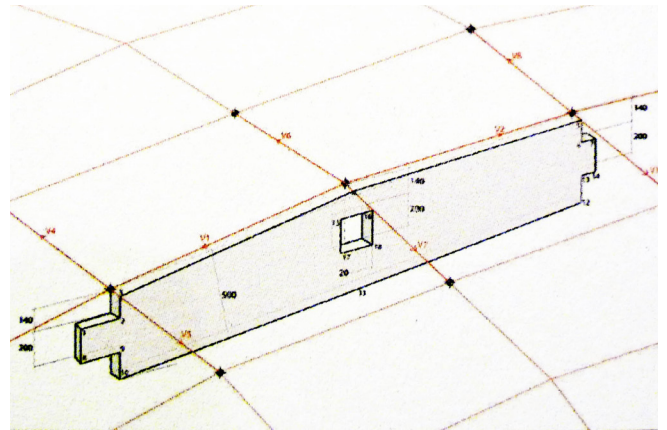
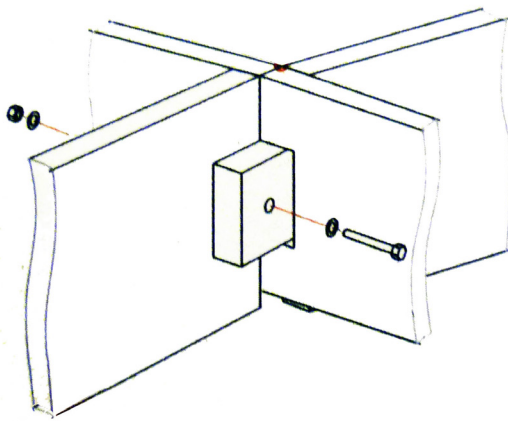
No hay una clara dirección de las cargas ni una jerarquía estructural hasta que se alcanza de soporte perimetral. El esquema estructural, con conexiones mediante pasadores permite un sencillo anclaje (las fuerzas de flexión no necesitan ser transferidas). Los extremos de los dos elementos encuentran en un agujero rectangular en el punto medio de un tercero.





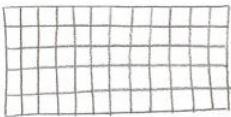
Derecha: Fig. 30. Vista exterior del pabellón de Siza y Souto de Moura.

Abajo: Fig. 31. Sistema de montaje mediante los elementos de encuentro y los de enganche.

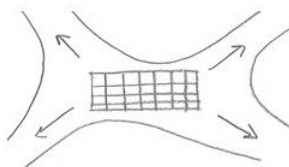


## Definición del proyecto:

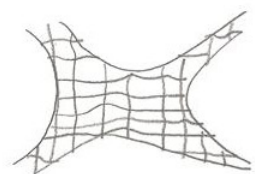
### 1\_Malla



Se parte de una trama estructural ortogonal



Se extiende este entramado hasta adaptarse a la forma deseada en planta



Las líneas estructurales se deforman según los esfuerzos, generando "movimiento"

### 2\_Sección



Típica disposición para la cobertura de un espacio

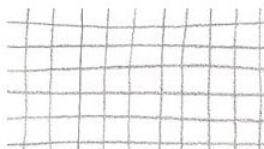


Modificación a una sección más orgánica que se adapta al emplazamiento de una forma más amable

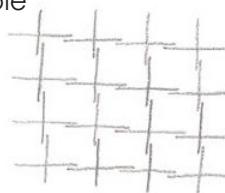


Sistema de apoyo mediante un "zapato" metálico y atornillado a la estructura

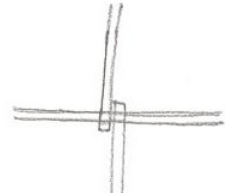
### 3\_Ancajes



Normalmente uniones continuas



Uniones por superposición de elementos dispuestos en cruz. Genera movimiento



Detalle tipo de unión de los elementos: el elemento central ata a otros dos



Derecha: Fig. 32. Vista interior del pabellón de A. Dempsey, A. Huang y A. Kara

Abajo 1: Fig. 33. Detalle del entramado estructural.

Abajo 2: Fig. 34. Modelado 3D del montaje de la estructura.



### DRL Ten Pavillion, 2007, A. Dempsey, A. Huang y A.Kara, Londres

Este pabellón es fue uno de los primeros ejemplos completos de arquitectura diseñada mediante parámetros. Las claves de su éxito fueron: la rápida constructibilidad, la optimización del material y la sencillez y elegancia de la forma. Posee una presencia imponente desde la distancia pero desde una posición más cercana revela su ambigüedad a través de la fusión de curvas sinuosas, que desempeñan las funciones estructurales y programáticas en una forma única y continua. Cuando el espectador comienza a recorrer el pabellón la superficie te envuelve variando de opaca a transparente, produciendo un efecto moire tridimensional, mientras que a su vez proporciona un paso para los peatones. Es decir no posee ni dentro ni fuera.

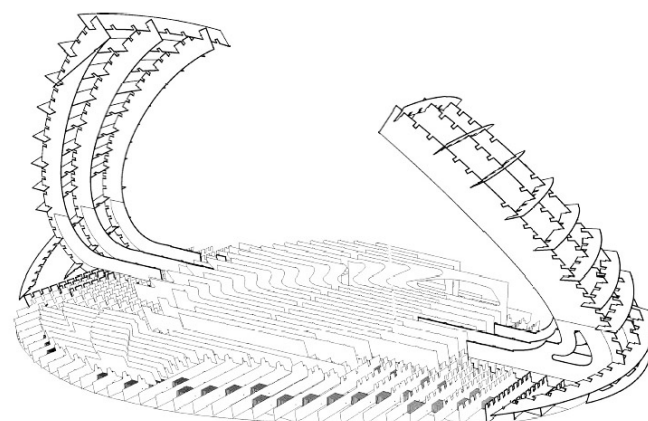
**Punto de partida:** investigación sobre la optimización de la geometría de una estructura discontinua mediante la utilización de diversos scripts para realizar la subdivisión de la isocurva, para desenrollar y aplanar cada uno de los paneles o para realizar los anchos de las muescas en las intersecciones de los perfiles.

**Estructura:** Todo el pabellón (estructura, piel, suelo, paredes y el mobiliario) esta realizado en elementos de fibra C, es decir en láminas de hormigón reforzadas con fibra de vidrio resistentes al agua con sólo 13 mm de espesor, conformando un total de 850 cortadas cada una con un perfil diferente y unidas mediante 2400 juntas de neopreno atornilladas con diferentes ángulos de conexión.

La cubierta discontinua abarca más de 10 m con un trabajo a tracción gracias a las juntas simples de unión, en las cuales se mitiga la aparición de pequeñas microfisuras en la superficie de la fibra C mediante el uso de materiales ligeros (neopreno). Una vez construido la parte de anclaje, todo el pabellón podría ser montado

manualmente.

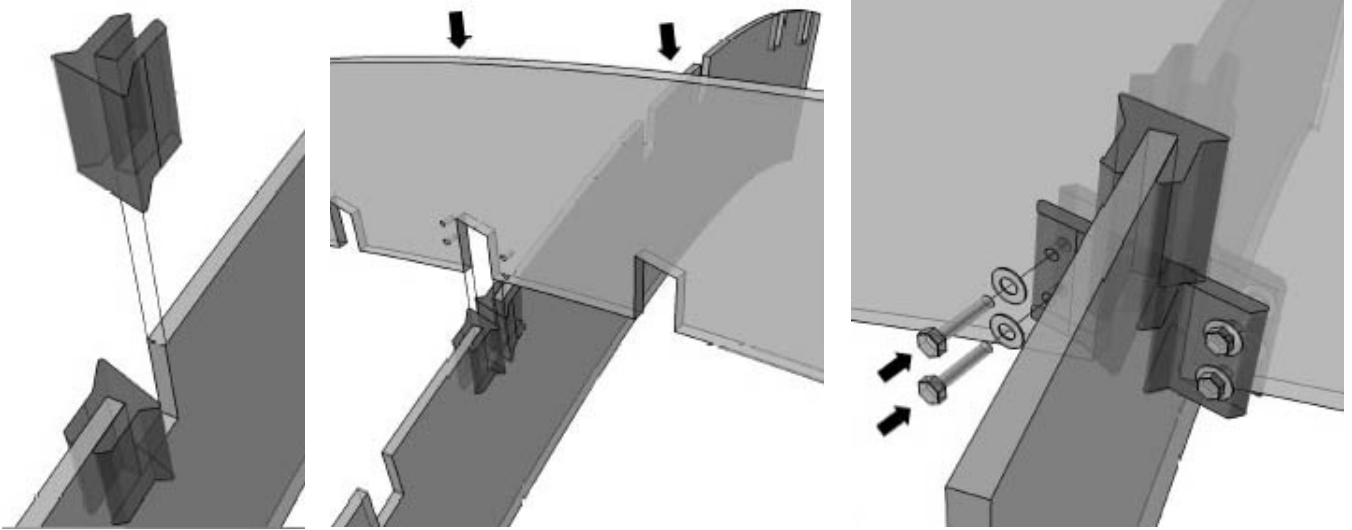
El proceso de diseño se realizó mediante procedimientos paramétricos 3D, con programas de cálculo estructural basados en el análisis no lineal y en la parte del desarrollo físico, los elementos fueron fabricados directamente desde los modelos informáticos por equipos de corte CNC para posteriormente ser trasladadas a obra donde se ensamblaron "in Situ", habiendo previamente estudiado en el laboratorio diferentes tipos de uniones.



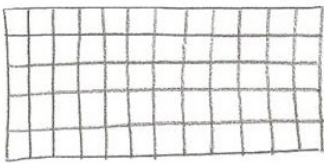


Derecha: Fig. 35. Vista exterior del pabellón de A. Dempsey, A. Huang y A. Kara

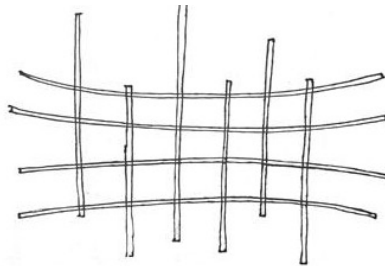
Abajo: Fig. 36. Explicación paso a paso del anclaje de los elementos.



### Definición del proyecto:



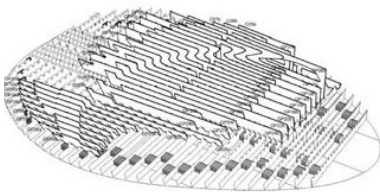
1\_ Típica distribución de malla estructural, ortogonal



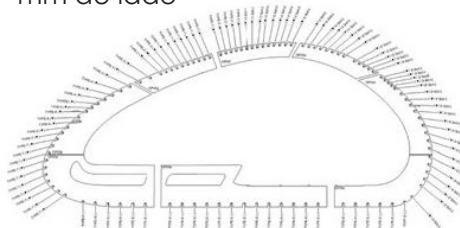
2\_ Modificación de la malla tipo para crear una estructura discontinua, formando cuadrados de 200 mm de lado



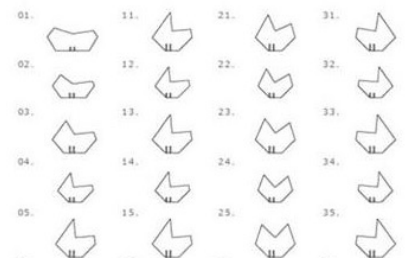
3\_ Creación de una volumetría atractiva y adaptación de la malla a dicha geometría



4\_ Se crea la base que ancla al suelo del pabellón



5\_ Se diseña la geometría del elemento principal encargado de sujetar a los elementos horizontales



6\_ Se procede al listado de piezas (todas de ellas diferentes) para simplificar su fabricación



Derecha: Fig. 37. Vista interior del pabellón de A. Menges y J. Knippers.

Abajo 1: Fig. 38. Detalle del anclaje dentado de los elementos.

Abajo 2: Fig. 39. Modelado 3D para cálculo estructural.



## **Pabellón ICD/ITKE 2011, A. Menges y J. Knippers, Stuttgart**

Este pabellón fue concebido con un gran carácter experimental desde su comienzo con el lema de “aprender haciendo”. Se partió de un estudio de las formas naturales (erizo de mar) y del uso de herramientas multidisciplinarias como el diseño computacional o la construcción robotizada. El paso de la biología a la arquitectura se produjo regularizando la forma orgánica original y solucionando geométricamente las uniones naturales, para que en ellas no se produjera ningún momento de fuerza.

Se establecen dos entidades espaciales distintas: un gran espacio interior con una capa interna porosa y una gran apertura que vuelca a la plaza pública y un espacio intersticial menor envuelto entre las dos capas que exhibe la lógica constructiva de la cáscara de la capa doble.

**Punto de partida:** investigación sobre las posibilidades de transferencia morfológica desde un organismo natural a la arquitectura, mediante la creación de un sistema modulado de placas poligonales unidas entre sí mediante juntas dentadas.

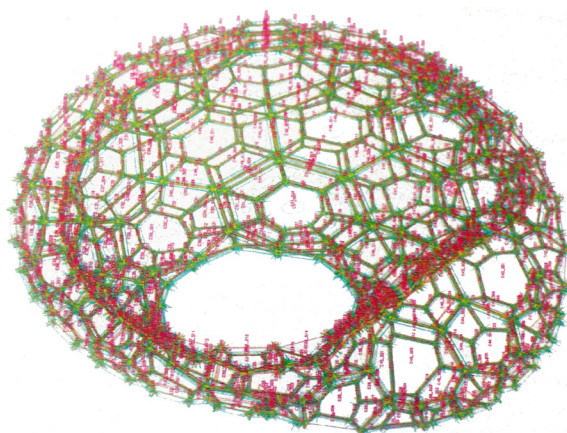
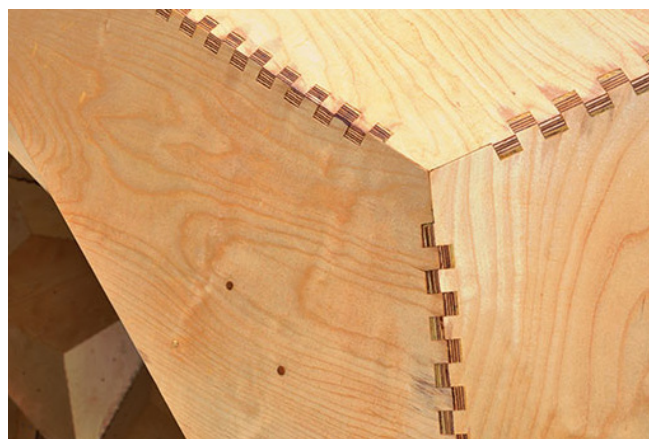
**Estructura:** En un mismo punto siempre confluyen tres bordes de diferentes elementos, este principio permite la transmisión de la fuerza axil y el cortante, asegurando la flexibilidad en los bordes, por lo que la estructura es deformable (los elementos se estiran y orientan según los esfuerzos mecánicos).

Varias láminas de madera se pegan entre sí para formar un elemento, mientras que varios elementos se unen entre sí mediante un simple tornillo, lo que facilita el montaje del pabellón. Se consigue una construcción ligera ya que puede ser construido solamente con láminas de madera contrachapada de 6'5 mm de espesor, aunque para resistir las cargas de succión

del viento es necesario anclarlo al terreno.

Para el diseño, desarrollo y realización de la compleja morfología del pabellón se creó un bucle cerrado de información digital entre el modelo y el proyecto, calculado mediante simulaciones de elementos finitos y un equipo de control numérico, ya que la definición de la forma y diseño estructural están estrechamente vinculados entre sí.

Las láminas y las articulaciones de los dedos de cada elemento se produjeron mediante el sistema de fabricación de robótica, permitiendo la producción económica de más de 850 componentes geométricamente diferentes, así como más de 100.000 articulaciones de los dedos dispuestos libremente en el espacio.





Derecha: Fig. 40. Vista exterior del pabellón de A. Menges y J. Knippers.

Abajo Izq.: Fig. 41. Construcción de elementos mediante CNC.

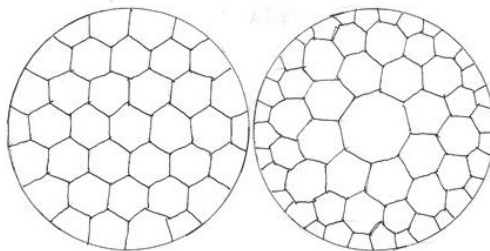
Abajo Dcha.: Fig. 42. Montaje manual de los elementos.



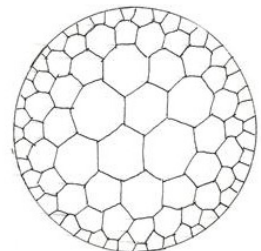
## Definición del proyecto:



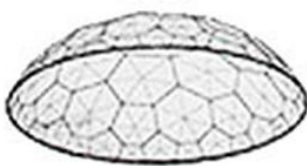
1\_ Estudio morfológico del caparazón de un erizo de mar



2\_ Disposición de un entramado poligonal (6 y 7 lados) inscrito en una circunferencia



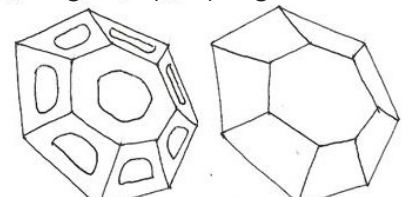
3\_ Redistribución del entramado para que pueda adaptarse a la volumetría exterior. Conjunto de hexágonos y heptágonos



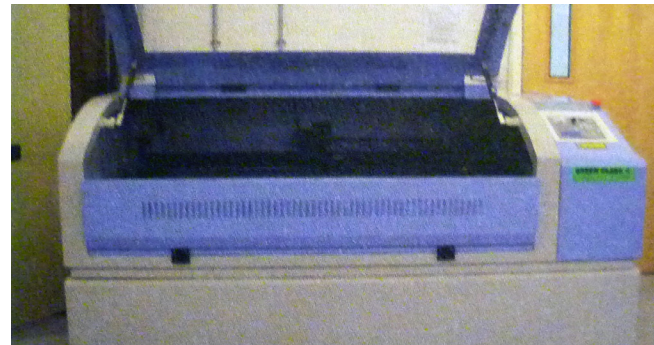
4\_ Se levanta el centro de la circunferencia creando un volumen con forma similar a la de una cúpula



5\_ Se introducen variaciones a la volumetría para crear los accesos al pabellón



6\_ Se recubre el entramado de volumen con elementos tridimensionales formados por 2 caras: la interior (porosa) y la exterior (opaca)



Arriba: Fig. 44. Impresora 3D cerrada.

Izquierda: Fig. 43. Máquina CNC trabajando unas piezas.

#### 4\_Herramientas y estrategias para el campo de la arquitectura.

Como se ha visto anteriormente en los ejemplos estudiados, el ordenador ha sido un agente activo y dinámico en su concepción y construcción, al haber sido capaz de integrar las ideas, desarrolladas por los arquitectos, con los procesos de fabricación disponibles, es decir gracias a los programas de 3D se ha conseguido que los datos de diseño sean a su vez los datos de construcción. No se puede entender una creación paramétrica sin conocer los métodos de fabricación digital, ya que si estos se olvidan o se desconocen, resulta prácticamente inviable su realización debido al incremento exponencial del presupuesto. Históricamente para ser económicamente viables los elementos de construcción debían ser geoméricamente sencillos, pero hoy en día, al ser capaces de aunar multiplicidad con complejidad, se ha podido pasar de la estandarización a la fabricación de componentes únicos y personalizables. Por ello en las siguientes líneas se van a mostrar varias técnicas y dispositivos de fabricación digital para comprender los diversos límites y tolerancias que poseen, lo cual facilitará el uso creativo y eficiente de los materiales arquitectónicos en el proyecto.

Las técnicas de construcción digital se dividen generalmente en cuatro categorías: corte, sustracción, adición y formación. La primera de ellas, el corte, se trata del método más conocido y accesible por permitir la generación de elementos planos a partir de láminas de diversos materiales gracias a un cabezal de corte. Esta técnica está limitada por el grosor del material que la máquina es capaz de cortar, por ello se encuentran distintas aplicaciones como el rayo láser, adecuado para materiales relativamente finos, capaz de fabricar formas complejas y detalladas que incorporan aberturas o estampados grabados debido a su gran precisión. Por

contra la mayoría de máquinas disponibles de este tipo, son relativamente pequeñas limitando el tamaño de las piezas a cortar, además de ser un proceso similar a los métodos convencionales, teniendo que ensamblar posteriormente todos los elementos de forma manual. Otros tipos de maquinarias menos accesibles destinadas al corte son el láser rotatorio, para objetos tridimensionales, el chorro de plasma o el chorro de agua.

Las procedimientos basadas en la sustracción consisten en eliminar el material sobrante de un volumen sólido mediante un proceso de fresado o recorte, lo que genera ventajas respecto a las tecnologías de corte, haciendo posible producir elementos de tamaño mucho mayor y de más diversidad de materiales a la vez que se economiza su producción por tratarse de máquinas más veloces. Dichos mecanismos funcionan mediante un programa CNC que coordina diversas tareas mediante scripts, como control de movimiento, cambio de herramienta o funcionamiento de los ejes, que manda a la máquina de manera ordenada. Con esta técnica no sólo se pueden producir diversos elementos sino también existe la posibilidad de producir moldes geoméricamente sofisticados. Tanto el proceso de fresado como el de recorte usan cortadores rotativos, pero la principal diferencia radica en que el fresado resulta útil para el metal mientras que el recorte es eficaz con la madera y el plástico. Las máquinas más empleadas son las de tres o cinco ejes siendo estas últimas capaces de producir formas más complejas por poseer dos ejes rotativos además de los fijos, pudiendo así realizar multitud de tareas como perforar, lijar, serrar, contornear o devastar.

En el ámbito opuesto a los dos métodos anteriores se encuentra la técnica de la adición que consiste en acumular por capas el material en lugar de eliminarlo, realizando una traducción





Arriba: Fig. 45. Estudio Faulders. (2010). BAMscape para el Berkeley Museum and Pacific Film Archive.

Derecha: Fig. 46. Emergent y Tom Wiscombe. (2003). Urban Beach para el MOMA de Nueva York.



del diseño tridimensional en varias capas bidimensionales, lo cual resulta ventajoso debido a la ausencia de necesidad de moldes por lo que no se requiere un conocimiento especializado para su uso, además de poseer un entorno de trabajo cerrado que elimina los ruidos, haciendo posible su instalación en cualquier estudio. El proceso más común de esta técnica es el prototipado rápido, el cual se comenzó a comercializar a finales de los ochenta basándose en polímeros líquidos que cambiaban de estado cuando eran atravesados por una luz láser. Actualmente el método más conocido es la impresión 3D, capaz de crear objetos complejos mediante la adhesión de varias capas de almidón o cerámica en polvo. Uno de sus mayores inconvenientes es que estos elementos suelen poseer una durabilidad temporal, por ello existen otras técnica más avanzadas como la construcción por corte y laminado, el proceso de deposición de hilo fundido o el modelado multibocalla. De momento el uso de maquinaria por adición en el ámbito de la arquitectura es escaso debido a la imposibilidad de crear elementos de grandes dimensiones, pero resulta muy útil en la fase de diseño, permitiendo observar y examinar geometrías complejas mediante objetos físicos, un ejemplo real de ello sucede en la obra de la Sagrada Familia en Barcelona en la cual mediante el programa paramétrico Grasshopper se mandan elementos geométricos a estas máquinas para comprobar de manera tangible su eficacia.

La última técnica de construcción digital pertenece a la categoría de formación, en donde no se trata de eliminar o superponer material sino más bien se sirve de las fuerzas mecánicas como el calor o el vapor para remodelar los materiales otorgándoles el contorno deseado, para ello se hace uso de la robótica por presentar un número ilimitado de aplicaciones, aunque debido a la dificultad de manejo y ergonomía de la maquinaria, solo se encuentran

ejemplos experimentales y de investigación en el campo de la arquitectura.

Todas estas herramientas no tendrían razón de ser sin la implementación de una estrategia de diseño que permita maximizar la utilidad de estas técnicas, haciendo necesario adoptar mayoritariamente una perspectiva basada en la geometría, lo que evita realizar una idea totalmente aleatoria e incontrolable, necesitando que el arquitecto no desarrolle un papel de mero diseñador sino también de fabricante o de editor. Una de estas estrategias para la creación de una instalación temporal sería el contorneado, en el que mediante la superposición de piezas planas, se puede conseguir alterar la materialidad física, dando una forma tridimensional a alguna de sus caras. Esta es la idea que persigue el proyecto BAMscape ideado para el Berkeley Museum and Pacific Film Archive por el estudio Faulders, simplemente juntando más de 150 módulos de poliestireno revestidos de contrachapado y curvándolos de manera diferente en una de sus caras, gracias a la ayuda de una máquina CNC se consigue crear una instalación estéticamente impactante e innovadora, la cual a su vez posee capacidad formal cambiante al reagrupar de cualquier manera aleatoria dichos módulos.

Otra de las estrategias para la obtención de volúmenes tridimensionales, muy eficaz si lo que se pretende es diseñar una geometría estructural, es el plegado, donde articulando superficies planas se consigue dotar de mayor rigidez a dichas láminas y gracias al uso de programas paramétricos se puede proceder al cálculo de los patrones de plegado, para ello los materiales de las hojas deben ser flexibles por su naturaleza. Emergent y Tom Wiscombe crearon en 2003 el proyecto *Urban Beach* para el MOMA de Nueva York que sigue esta teoría, creando una serie de superficies plegadas a modo de toldo y que a su vez consiguen integrar varios



Arriba: Fig. 48. Estudio Franken. (1999). Bubble para la feria de muestras de BMW.

Derecha: Fig. 49. Zaha Hadid. (2009). Pabellón Burnham en Chicago.



elementos programáticos como piscinas o zonas de descanso. Cada uno de estos pliegues se colocaron atendiendo a las necesidades de sombreado de cada zona, mientras que aplicando la norma de conseguir la superficie mínima mediante geometrías parabólicas y conoides se realizó el recubrimiento de la estructura en aluminio, por la noche gracias al juego de luces se hace resaltar la estructura destacando su complejidad.

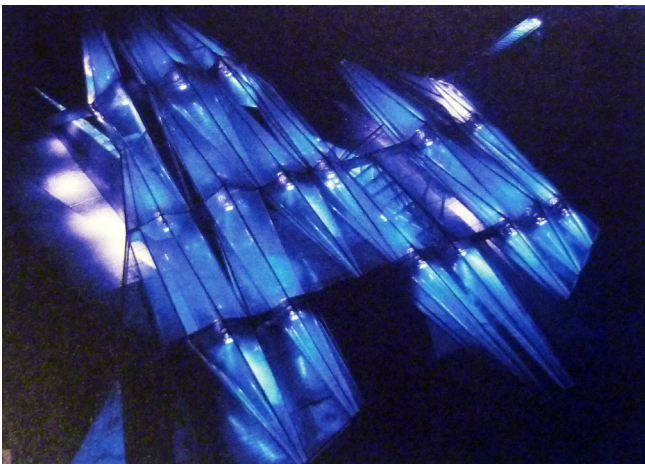


Fig. 47. Emergent y Tom Wiscombe. (2003). Urban Beach para el MOMA de Nueva York

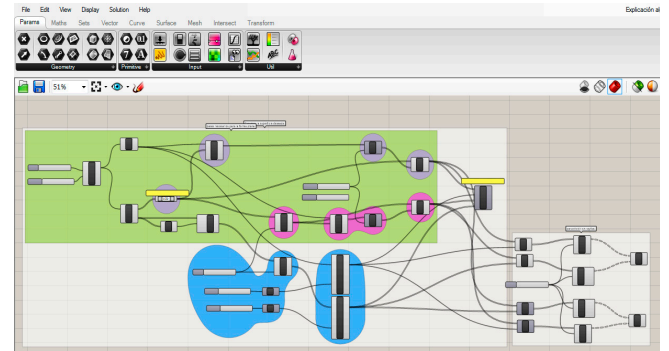
Uno de los métodos de construcción más tradicionales, además de económico, es el conformado. Utilizado normalmente para la creación de componentes estructurales prefabricados como vigas o pilares, pero que se puede adaptar también para el diseño de edificios digitales por lo que es necesaria la creación de un molde mediante CNC o por prototipado rápido, que permita reproducir un número ilimitado de componentes, como ocurre en el pabellón *Bubble* para la Feria de Muestras de BMW en 1999 en Frankfurt desarrollado por el estudio Franken. Fue uno de los primeros volúmenes creado íntegramente, incluso constructivamente, mediante modelos paramétricos, en él se pretendía recrear una ligera gota de agua, para lo que se fabricaron 35000 componentes estructurales de aluminio cortados mediante chorro y gra-

cias a la técnica de conformado se moldearon, con bloques de espuma fresados por máquina CNC, 305 paneles de cristal acrílico para el cubrimiento de la estructura.

Otra de las estrategias que viene de la tradición es el seccionado, utilizada principalmente en la construcción de barcos y aviones ya que se trata de un método encargado de crear componentes en relación con la geometría de una superficie, lo cual se traduce en la era digital a la posibilidad, mediante cortes seccionales, de reunir los datos necesarios para controlar las máquinas de corte de una forma rápida, efectiva y fácilmente realizable a escala real. Zaha Hadid, fiel defensora del empleo de la parametrización, diseñó en 2009 el *Pabellón Burnham* (desmontable) en Chicago. En él consigue crear una geometría curvilínea mediante una estructura de aluminio doblado a base de complejas secciones soldadas para posteriormente ser recubiertas, interior y exteriormente, por una tela encargada de crear una apariencia fluida, además al igual que en muchos pabellones temporales, de los que se ha hablado anteriormente, pertenecientes a la primera mitad del siglo XX, se pretendía que su forma sirviera para poder proyectar sobre ella una instalación audiovisual.

La última de las estrategias a tratar es el teselado, que como las anteriores también parte de una arraigada tradición histórica más cercana a la artesanía para la creación de mosaicos. Consiste en la concepción de elementos que al ensamblarse unos con otros forman una superficie continua sin fisuras ni solapamientos, estos elementos denominados teselas pueden poseer la forma que se desee. Los programas paramétricos permiten optimizar los patrones a partir del traslado de mallas digitales, pertenecientes a cualquier forma, a las máquinas de corte que desarrollen los componentes. Esta tipología está siendo explotada por multitud de





Arriba: Fig. 51. Visualización general Grasshopper

Izquierda: Fig. 50. Estudio Gang. (2003) Marble Curtain en Washington.

despachos de arquitectura por su utilidad en el diseño de fachadas o cubiertas convencionales, pero también puede ser empleada en el campo de lo temporal y la experimentación con diversos materiales como es el caso de la instalación en 2003 del *Marble Curtain* en el *National Building Museum* de Washington a cargo del estudio Gang, en la que pretendía realizar un estudio sobre la capacidad estructural de la piedra, para lo que diseñaron unas teselas a modo de puzle cortadas mediante chorro de agua, llegando a conseguir un espesor mínimo de 10 milímetros en cada pieza, logrando crear una volumetría de piedra translúcida de 5'5 metros de altura.

## 5\_ Experiencia personal, programa Grasshopper.

Tras este recorrido por diversos pabellones, técnicas de construcción digital y de aportar ideas de posibles ventajas o inconvenientes del empleo de la arquitectura paramétrica, aun no se ha expuesto cómo es realmente un programa paramétrico y cuál es su funcionamiento básico, por ello se va a proceder a explicar un ejemplo diseñado y llevado a la realidad. Se tomará como referencia al programa *Grasshopper* que utiliza una programación visual permitiendo un nivel de abstracción mayor que la programación tradicional, ya que realmente su función es hacer de intermediario entre dos lenguajes de programación, dicha plataforma trabaja coordinada con el programa *Rhinoceros*, en el cual se visualiza el modelo tridimensional.

No hay que olvidar que el programa no tiene el fin de realizar el diseño de resultado en concreto, sino que se trata más bien de la creación de un objeto que pueda modificarse según las exigencias deseadas en cada momento. *Grasshopper* trabaja con "pilas" que van conectadas unas con otras según la función que queramos mandar mediante "cables" transportan

la información. Estas "pilas" u objetos pueden ser de tres tipos: los que se encargan de almacenar parámetros, son representados por una "pila" alargada, los componentes que son los que fabrican el modelo, con un formato en tres bandas de izquierda a derecha (una se entrada, otra gris con el nombre y una de salida) y por último se encuentran los que no forman parte ni de parámetros ni componentes, sino que simplemente sirven de ayuda para anotar o mostrar resultados.

El ejemplo práctico a estudiar se trata de un modelo realizado en el taller de fabricación dirigido por Quique Soriano, Francisco Tabanera y Pep Tornabell, dentro del seminario Algomad 2013 sobre métodos generativos en arquitectura y diseño con sede en ELISAVA en Barcelona. En este prototipo lo que se pretende realizar es una cubierta ligera a base de paraboloides en la que todos ellos poseen un vértice coincidente, que será el centro en el que converge el modelo. El proceso de diseño parte de la creación de un polígono de tres lados inscrito en una circunferencia, tras el cual se crearán una serie de vectores que serán los encargados de generar la superficie, después de obtener la forma, será dividida con el objetivo de crear una estructura alámbrica para dicha superficie, que aligere el peso para su posterior construcción. Pudiendo distinguir los siguientes pasos:

1\_ Se crea un polígono mediante el componente *polygon* y se le otorgan los valores del radio de la circunferencia y el número de lados mediante un *slider*, lo que permite modificar en cualquier momento dichos valores.

2\_ Con el comando *explode* conseguimos explotar los segmentos del polígono. Creamos una lista de valores mediante *list length* y le restamos 1 para que componente *cull index* saque una lista con la ubicación únicamente de los vértices. Para la creación de los



paraboloides debemos colocar también un punto (en nuestro caso en el centro) de cada segmento que poseamos para posteriormente sea los límites de cada paraboloide.

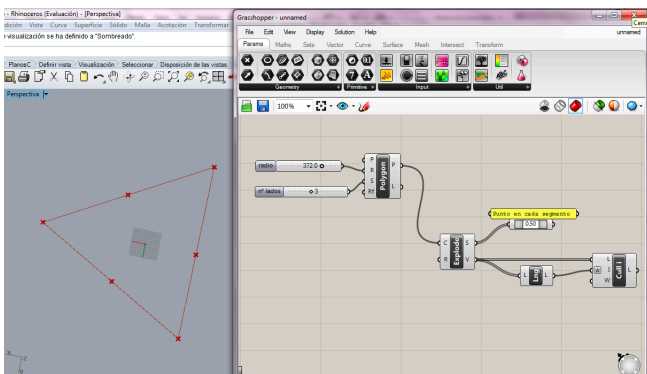


Fig. 52. Programa Grasshopper, paso 1y 2

3\_ Mediante el componente *area* colocamos un punto en el centro del polígono. Después se procede a la creación de los cuatro vectores directores.

4\_ El primer vector será el que resulta de unir el centro con el punto que se ha colocado en mitad de cada segmento. El segundo unirá los mismos puntos que el primero pero desplazando 1 en la lista los puntos medios del segmento. Para ellos se tomará mediante el componente *amplitude* una longitud dada, también mediante un *slider*, para mover, mediante *move*, hasta ese punto dicho vector.

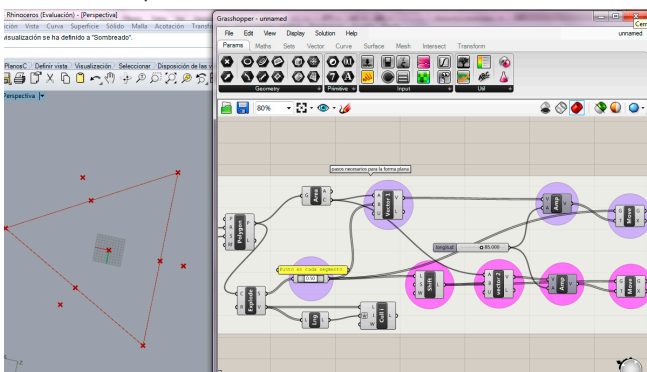


Fig. 53. Programa Grasshopper, paso 3y 4

5\_ Una vez acabada la forma plana, se procede a darle volumen mediante dos vectores unitarios en el eje z que irán desde los puntos del plano hasta la altura deseada (un *slider*).

6\_ Ahora mediante el componente *4 point surface* creamos una superficie que pase por los cuatro vectores que hemos dispuesto. La geometría ya estaría finalizada y podríamos pasarla al programa Rhino para su posterior renderización mediante la opción *bake*. Una cosa importante a tener en cuenta es que la pieza solo puede ser editada cuando pertenece a *Grasshopper*, una vez exportada es un objeto independiente del código.

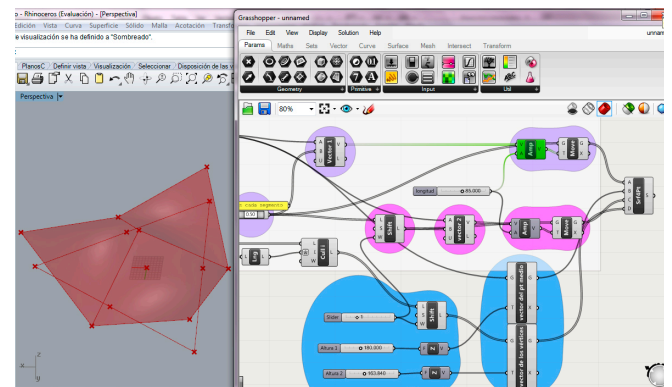


Fig. 54. Programa Grasshopper, paso 5y 6

7\_ El siguiente paso a realizar será trazar unas líneas que sirvan de estructura para dicho volumen con el objetivo de facilitar su construcción. Por lo tanto creamos cuatro líneas que unan los puntos entre unos vectores y otros, de este modo, gracias al comando *divide* se pueden dividir dichos segmentos en el número de partes deseadas (*slider*).

8\_ Finalmente se crearán líneas que unan las listas de puntos dos a dos, siendo necesario invertir los puntos de una de las listas para que tomen la dirección de la curva en la que se encuentran.





Arriba: Fig. 58. Vista interior de la cubierta.



Derecha: Fig. 59. Detalle de las uniones de la cubierta.

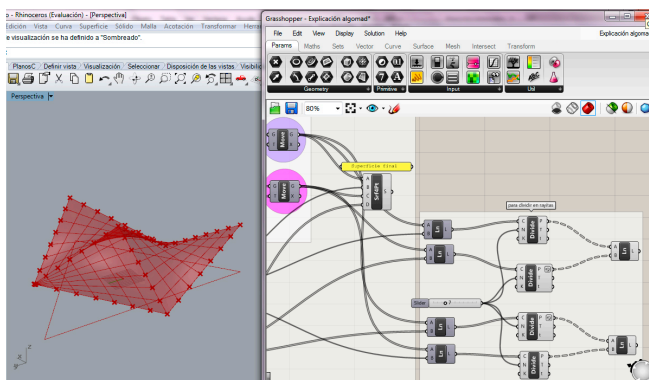


Fig. 56. Programa Grasshopper, paso 7 y 8

9\_ Una vez "cocinado" y enviado a *Rhino* se procede a crear la descomposición de estas líneas para su construcción. En este ejemplo se optó por bandas de madera muy fina cortadas mediante una máquina CNC y con unas uniones diseñadas digitalmente para que la cubierta pudiera ser ensamblada de manera manual, si necesitar sujeciones y muy rápidamente.

En las imágenes (Fig. 55, 58 y 59) podemos comprobar como mediante un material muy ligero se consigue un modelo eficiente capaz de resistir estructuralmente su peso propio, necesitando únicamente como apoyos tres mesas y pudiendo realizar su puesta a punto en tan solo una mañana.

Sin embargo si en algún momento fuera necesario aumentar el número de apoyos, la altitud o la superficie de cobertura, se puede comprobar que invirtiendo simplemente unos pocos minutos, el modelo puede variar completamente, a la vez que también podemos modificar la forma de su construcción, olvidándonos de una superficie realizada mediante bandas de madera, pudiendo llegar a obtener un volumen sólido, teselado, reticulado mediante ecuaciones matemáticas como el diagrama de voronoi, etc. Pudiendo así con la ayuda de otras extensiones del programa más avanzadas comprobar cuál de todas las soluciones funciona mejor estructu-

ralmente o cual produce un asoleamiento más adecuado, puesto que cualquier función que dependa de una expresión matemática puede ser implementada en un programa paramétrico.

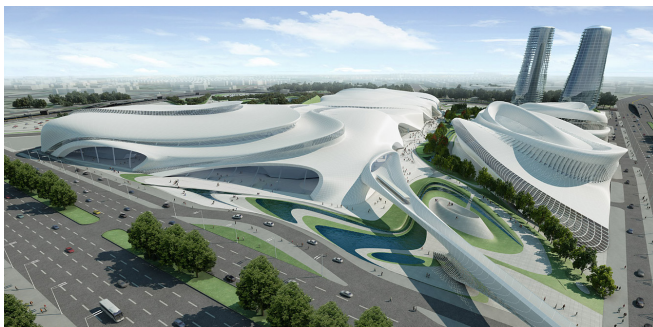


Fig. 57. Breve modificación del código para conseguir una cubierta opaca de 8 paraboloides.

## 6\_Conclusión

A lo largo de su historia el hombre siempre ha intentado destacar del resto de la población, a menudo se ha servido del diseño como medio para alcanzar dicho objetivo, por ello muchos arquitectos se han esforzado en investigar y experimentar formas, materiales o estructuras nuevas. Las exposiciones internacionales no eran más que viveros de ideas en las que los profesionales intentaban dar lo mejor de sí mismos, muchas veces corriendo el peligro de caer en la ostentación y el formalismo. Hoy en día nos encontramos ante una situación de grandes cambios que invitan a hacerse una pregunta de difícil respuesta, ¿cuál será el verdadero futuro de la arquitectura? ¿Conseguirá la arquitectura paramétrica abrirse camino para su desarrollo?

En épocas de crisis como en la que vivimos se deben abrir rutas a explorar, siempre dentro de lo sostenible, para descubrir el camino hacia el que evolucionar. Una de ellas, el diseño paramétrico, es aún un campo emergente que tras la experimentación puede abrirnos puertas hacia novedosas técnicas biológicas, digitales



Arriba: Fig. 60. Zaha Hadid. (2009). Proyecto para la nueva exposición de la ciudad del Cairo.



Derecha: Fig. 61. A. Menges. (2013). Hygro Skin pavilion ICD Stuttgart.

o sostenibles. La mayor apuesta de lo paramétrico reside en cambiar la concepción del proyecto de arquitectura modificando el concepto de edificio a una tipología adaptable que pueda responder con mayor precisión a las necesidades específicas de cada emplazamiento y a mejorar poco a poco el funcionamiento de dicha tipología mediante la repetición de un proceso. No hay que pensar en que el diseño formal será la apuesta ganadora, ya que no consiste, como algunos arquitectos de nuestro tiempo creen, en revestir un edificio sencillo con una ropa nueva, con formas más o menos curvas y quebradas, porque al separar la lógica formal, funcional y material de un sistema paramétrico solo se obtienen incongruencias que no hacen más que disparar los presupuestos para crear edificaciones totalmente insostenibles. Desde luego en nuestra época parece carecer de sentido el pensar que esta corriente tenga mucha mayor continuidad en el tiempo.

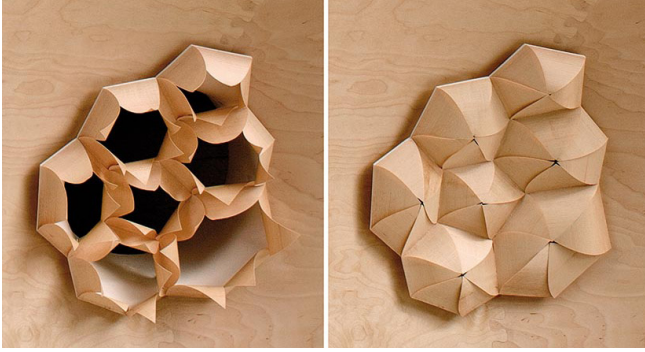
Quizá uno de los problemas a los que se debe esta confusión sea porque la misma tecnología que permite obtener imágenes estrambóticas y sugerentes es también la que posee la clave para convertirlas en realidad. Sin embargo la verdadera idea que la arquitectura paramétrica persigue es mucho más humilde, alejándose de los proyectos como performance, intentando facilitar los procesos de diseño y construcción, optimizando recursos y buscando una originalidad apoyada en una base geométrica, que al fin y al cabo desde la antigüedad, ésta siempre ha sido tomada como origen.

Uno de los campos a investigar que puede aportar nuevas ideas, es el relacionado con la experimentación del material aunado con las técnicas de fabricación digital, en este terreno es importante destacar los estudios realizados por el *Institute for Computational Design ICD* de la facultad de arquitectura y urbanismo de Stuttgart, dirigido principalmente por A. Menges,

en el que cada año presentan un pabellón temporal, algunos buscan buscar una mimesis biológica, como ya hemos analizado en detalle con anterioridad o una investigación exhaustiva del material, como el *Hygro Skin* que ha sido presentado en estos últimos días, el cual es un artefacto sorprendente que cuenta con una piel de madera muy fina que posee sensibilidad meteorológica, el material posee propiedades higroscópicas, es decir, es capaz de cambiar de forma según la humedad del aire. Gracias a unos intensos análisis en laboratorio se ha determinado el grosor mínimo que debe poseer la madera para que sea posible su adaptación. Cuando la humedad en el interior sea alta los huecos se abren para permitir la entrada de aire seco y cuando este porcentaje es el adecuado, se cierran volviendo a su posición original, todo ello de manera natural y sin necesidad de emplear ningún tipo de maquinaria. El campo de investigación sobre las cualidades de la madera puede ayudarnos a redescubrir un nuevo material con propiedades infinitas.

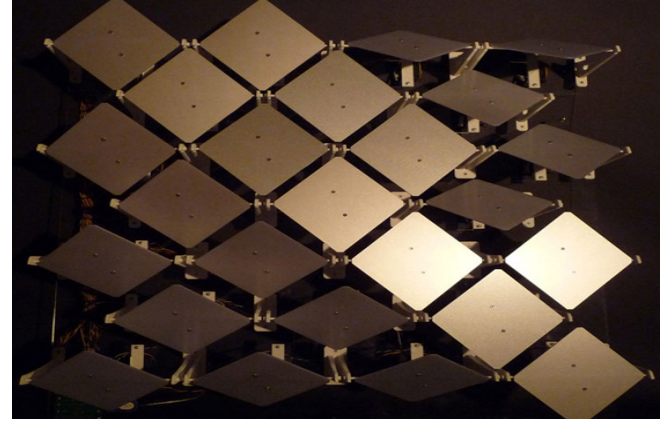
Otras investigaciones apuntan al campo de las fachadas sensibles capaces de proporcionar los niveles de luz óptimos para el interior del edificio, como realizó en 2009 Marilena Skavara en su tesis sobre arquitectura adaptativa y computación para la escuela de arquitectura de Barlett, su proyecto *Adaptive Fa[CA]* de incorporaba las características computacionales de los autómatas celulares en combinación con la inteligencia artificial, consiguiendo que el sistema aprenda de sus propios errores para mover a la perfección las telas exteriores creando una fachada cambiante. Este tema entronca totalmente con la sostenibilidad y la componente bioclimática que deben cumplir nuestros edificios para ser respetuosos con el medio ambiente. Pudiendo hacerse extensiva no solo al campo de la arquitectura sino también al del urbanismo.





Arriba: Fig. 62. Detalle de huecos abiertos o cerrados según la humedad.

Derecha: Fig. 63. Marilena Skavara. (2009). Adaptive Fa[CA]de.



Para la experimentación en estas tecnologías tan avanzadas se debe renunciar al yo individual tomando un enfoque interdisciplinar entre arquitectos, ingenieros, biólogos o matemáticos, porque gracias al trabajo conjunto y la búsqueda constante se puede lograr optimizar al máximo los resultados. Es difícil saber cuántos despachos de arquitectura trabajan con estas técnicas ya que la apariencia de sus proyectos no tiene por qué ser singular, pero seguro que si se dispusieran de los conocimientos adecuados para su desarrollo, ya que no son herramientas fáciles de dominar, muchos serían los que se apuntarían a los programas paramétricos sin dudarlo.

La mayoría de los arquitectos visionarios y adelantados a su época, que ya se han citado antes como Buckminster Fuller o Frei Otto, incluso españoles como Emilio López Piñero o Antonio Gaudí, seguro que hubieran deseado ir de la mano de la parametrización ya que les hubiera permitido simplificar enormemente el exhaustivo estudio de la geometría descriptiva que debieron realizar, a la vez que lo hubieran visto como medio para adelantarse a su época. Y es que hay que dejar el camino al estudio y la experimentación, sin ella podemos perder nos la posibilidad de avanzar y en esto la arquitectura paramétrica aun es un campo desconocido por desarrollar. En la innovación está el futuro como resume en esta frase Alberto T. Estévez profesor de la ESARQ de Barcelona "Ciertamente, la ciencia ha superado la ficción. La utopía de hoy es la realidad de mañana, (hoy es mañana)" (Estévez, 2009).

# Referencia de imágenes

Fig. 1: (2012). Visualización de un modelo digital en Grasshopper, Rhino y Revit. Recuperado de: <http://geometrygym.blogspot.com.es/>

Fig. 2: Frank Gehry. (1992). Diseño por ordenador del museo Guggenheim Bilbao. Recuperado de: <http://moleskinearquitectonico.blogspot.com.es/2010/04/f-gehry-museo-guggenheim-bilbao.html>

Fig. 3: Matsys y Torabi. Aplicación del mismo algoritmo Voronoi a dos superficies y objetos diferentes. Recuperado de: [http://matsysdesign.com/wp-content/uploads/2009/06/IMG\\_4703.jpg](http://matsysdesign.com/wp-content/uploads/2009/06/IMG_4703.jpg) y <http://www.torabiarchitect.com/images/voronoi/Voronoi-chairlarge.jpg>

Fig. 4: Greg Lynn. (2008). The evening Line. Recuperado de: <http://www.orgone-design.com/blog/histoire-du-design/les-annees-2000/la-blob-architecture-et-le-blob-design-greg-lynn/>

Fig. 5: Tienda tradicional nómada. Recuperado de: <http://photo.fair-companies.com.s3.amazonaws.com/users/nicolas.boullosa/potos/4497805527a91176e84d.jpg>

Fig. 6: Teatro ambulante en el periodo del Renacimiento. Recuperado de: <http://laotraventana.obolog.com/teatro-renacimiento-barroco-2268366>

Fig. 7: Joseph Paxton. (1851). Crystal Palace. Recuperado de: <http://www.ecole.co/classics/paxton/crystal-palace-london-england/image-711/>

Fig. 8: Gustave Eiffel. (1889). Torre Eiffel. Recuperado de: <http://lanostalgiayelrecuerdo.blogspot.com.es/2012/09/paris-1910.html>

Fig. 9: George Ferris. (1893). Noria de Chicago. Recuperado de: <http://www.studyblue.com/notes/note/n/art-history-midterm-2030/deck/1374621>

Fig. 10: Corrales y Molezúm. (1958). Pabellón para la exposición de Bruselas. Recuperado de: <http://gastelujerezblog.files.wordpress.com/2010/03/1958-b-cym-c-i10.jpg>

Fig. 11: Le Corbusier. (1958). Bocetos para el Pabellón Phillips de la exposición de Bruselas. Recuperado de: <http://beautyofconcrete.files.wordpress.com/2013/03/le-corbusier-Phillips-pavillion-of-xenakis-brussels-word-fair-1958.jpg>

Fig. 12: Le Corbusier. (1958). Exterior del Pabellón Phillips de la exposición de Bruselas. Recuperado de: [http://beautyofconcrete.files.wordpress.com/2013/03/le-corbusier\\_philips-pavilion-of-xenakis-brussels-world-fair-1958.jpg](http://beautyofconcrete.files.wordpress.com/2013/03/le-corbusier_philips-pavilion-of-xenakis-brussels-world-fair-1958.jpg)

Fig. 13: Buckminster Fuller. (1981). Criterios para la creación de una cúpula geodésica. Recuperado de: [http://www.archdaily.com/253750/happy-birthday-buckminster-fuller-1895-1983/51d7473ce8e44ecad7000036\\_happy-birthday-buckminster-fuller-1895-1983\\_1333686954-sfmoma-fuller-01-geodesicdome-jpg/](http://www.archdaily.com/253750/happy-birthday-buckminster-fuller-1895-1983/51d7473ce8e44ecad7000036_happy-birthday-buckminster-fuller-1895-1983_1333686954-sfmoma-fuller-01-geodesicdome-jpg/)

Fig. 14: Buckminster Fuller. (1955). Traslado de cúpula geodésica para el cuerpo de marines. Recuperado de: Arquitectura Viva, Espacios Efímeros n.141

Fig. 15: Frei Otto. Experimentos con pompas de jabón. Recuperado de: [http://24.media.tumblr.com/tumblr\\_lzm1g5FEjg1royjuqo1\\_500.jpg](http://24.media.tumblr.com/tumblr_lzm1g5FEjg1royjuqo1_500.jpg)

Fig. 16: Frei Otto. (1973). Cubierta para una nave multiusos en Mannheim, grid-shell. Recuperado de: <http://farm4.staticflickr.com/3080/7269762646717097c6d5d0.jpg>

Fig. 17: E. Pérez Piñero. (1961). Proyecto ganador para teatro ambulante. Recuperado de: Escrig, F., 2012. Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil, Sevilla: Secretariado de publicaciones de la universidad de Sevilla.

Fig. 18: E. Pérez Piñero. (1966). Teatro transportable para los Festivales de España en La Coruña. Recuperado de: Escrig, F., 2012. Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil, Sevilla: Secretariado de publicaciones de la universidad de Sevilla.

Fig 19: Yutaka Murata. (1970). Pabellón Fuji para la Exposición de Osaka. Recuperado de: <http://rubens.anu.edu.au/htdocs/laserdisk/0358/35808.JPG>

Fig. 20: J.M. Prada Poole. (1971). Instant City. Recuperado de: Escrig, F., 2012. Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil, Sevilla: Secretariado de publicaciones de la universidad de Sevilla.

Fig. 21: S. Fujimoto. (2013). Serpentine Gallery. Recuperado de: [http://www.domusweb.it/content/dam/domusweb/en/architecture/2013/06/7/sou\\_fujimoto\\_serpentinegallery/Serpentine%20SFA%202953.jpg](http://www.domusweb.it/content/dam/domusweb/en/architecture/2013/06/7/sou_fujimoto_serpentinegallery/Serpentine%20SFA%202953.jpg)

Fig. 22: Toyo Ito. (2002). Serpentine Gallery. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 23: Montaje de los elementos de la cubierta. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 24: Pieza cuadrada de unión entre las vigas de la cubierta y las de la pared. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 25: Toyo Ito. (2002). Serpentine Gallery. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 26: Fases del proceso de montaje. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 27: A. Siza y E. Souto de Moura. (2005). Serpentine Gallery. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 28: Anclaje de los elementos de cubierta. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 29: Mapa de distribución de esfuerzos. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 30: A. Siza y E. Souto de Moura. (2005). Serpentine Gallery. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 31: Sistema de montaje mediante los elementos de encuentro y los de enganche. Recuperado de: Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture.

Fig. 32: A. Dempsey, A. Huang y A.Kara. (2007). DRL Ten Pavillion. Recuperado de: <http://www.core.form-ula.com/2007/11/05/drl-ten-pavilion-design-competition-2007/>

Fig. 33: Detalle del entramado estructural. Recuperado de: <http://placebrandingofpublicspace.wordpress.com/2013/01/18/aa-cspace-alan-dempsey-and-alvin-huang/>

Fig. 34: Modelado 3D del montaje de la estructura. Recuperado de: <http://placebrandingofpublicspace.wordpress.com/2013/01/18/aa-cspace-alan-dempsey-and-alvin-huang/>

Fig. 35: A. Dempsey, A. Huang y A.Kara. (2007). DRL Ten Pavillion. Recuperado de: <http://www.core.form-ula.com/2007/11/05/drl-ten-pavilion-design-competition-2007/>

Fig. 36: Explicación paso a paso del anclaje de los elementos. Recuperado de: <http://placebrandingofpublicspace.wordpress.com/2013/01/18/aa-cspace-alan-dempsey-and-alvin-huang/>

Fig. 37: A. Menges y J. Knippers. (2011). Pabellón ICD/ITKE. Recuperado de: Arquitectura Viva, Espacios Efímeros n.141

Fig. 38: Detalle del anclaje dentado de los elementos. Recuperado de: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553>

Fig. 39: Modelado 3D para cálculo estructural. Recuperado de: Arquitectura Viva, Espacios Efímeros n.141

Fig. 40: A. Menges y J. Knippers. (2011). Pabellón ICD/ITKE. Recuperado de: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553>

Fig. 41: Construcción de elementos mediante CNC. Recuperado de: Arquitectura Viva, Espacios Efímeros n.141

Fig. 42: Montaje manual de los elementos. Recuperado de: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553>

Fig. 43: Máquina CNC trabajando piezas. Recuperado de: Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura.

Fig. 44: Impresora 3D cerrada. Recuperado de: Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura, Barcelona: Blume.

Fig. 45: Estudio Faulders. (2010). BAMscape para el Berkeley Museum and Pacific Film Archive. Recuperado de: Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura, Barcelona: Blume.

Fig. 46: Emergent y Tom Wiscombe. (2003). Urban Beach para el MOMA de Nueva York. Recuperado de: Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura, Barcelona: Blume.

Fig. 47: Emergent y Tom Wiscombe. (2003). Urban Beach para el MOMA de Nueva York. Recuperado de: Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura, Barcelona: Blume.

Fig. 48: Estudio Franken. (1999). Bubble para la feria de muestras de BMW. Recuperado de: Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura, Barcelona: Blume.

Fig. 49: Zaha Hadid. (2009). Pabellón Burnham en Chicago. Recuperado de: Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura, Barcelona: Blume.

Fig. 50: Estudio Gang. (2003) Marble Curtain en Washington. Recuperado de: Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura, Barcelona: Blume.

Fig. 51: Visualización general con Grasshopper. Archivo personal.

Fig. 52: Programa Grasshopper, paso 1 y 2. Archivo personal.

Fig. 53: Programa Grasshopper, paso 3 y 4. Archivo personal.

Fig. 54: Programa Grasshopper, paso 5 y 6. Archivo personal.

Fig. 55: Modelo construido en el taller de fabricación del seminario Algomad 2013. Archivo personal.

Fig. 56: Programa Grasshopper, paso 7 y 8. Archivo personal.

Fig. 57: Breve modificación del código para conseguir una cubierta opaca de 8 paraboloides. Archivo personal.

Fig. 58: Vista interior de la cubierta. Archivo personal.

Fig. 59: Detalle de las uniones de la cubierta. Archivo personal.

Fig. 60: Zaha Hadid. (2009). Proyecto para la nueva exposición de la ciudad del Cairo. Recuperado de: <http://blog-arq.com/2012/08/27/arquitectura-parametrica/>

Fig. 61: A. Menges. (2013). Hygro Skin pavilion ICD Stuttgart. Recuperado de: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869>

Fig. 62: Hygro Skin pavilion. Detalle de huecos abiertos o cerrados según la humedad. Recuperado de: <http://icd.uni-stuttgart.de/?p=9869>

Fig. 63: Marilena Skavara. (2009). Adaptative Fa[CA]de. Recuperado de: [http://www.dailytonic.com/wp-content/uploads/2010/03/Marilena-Skavara\\_3.jpg](http://www.dailytonic.com/wp-content/uploads/2010/03/Marilena-Skavara_3.jpg)

# Bibliografía

Buchanan, P., 2011. Tectónica del espectáculo, los pabellones de la Serpentine, de Zaha Hadid a Zumthor. *Arquitectura Viva*, 141, pp. 28- 29.

Davis, D., 2013. A history of parametric. Daniel David's Blog, <http://www.danieldavis.com/a-history-of-parametric/>

Dunn, N., 2012. Proyecto y construcción digital en arquitectura, Barcelona: Blume.

Escrig, F., 2012. Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil, Sevilla: Secretariado de publicaciones de la universidad de Sevilla.

Estévez, A., 2009. Arquitecturas genéticas: nuevas técnicas biológicas y digitales, Barcelona: ESARQ (UIC)/SITES Books.

González, F., 2011. Espacios evanescentes, de la celebración a la innovación. *Arquitectura Viva*, 141, pp. 17- 23.

Kara, H. y Georgoulas, A., 2012. Interdisciplinary Desing: New Lessons from Architecture and engineering, Harvard University: Actar.

Meredith, M., AGU, Sasaki, M., P. Art, Desingtoproduction y Aranda/ Lash, 2007. From control to design: parametric – algorithmic architecture, New York: ActarD.

Muro, C., 1997. Arquitecturas fugaces. Madrid: Lampreave.

Salgado, M. A., 2012. Arquitecturas de lo invisible. Una salida frente a la posmodernización de la arquitectura. *Papers revista de crítica y teoría de la arquitectura*, 24, pp. 69- 80.

Más información:

Institute for Computational Design, Stuttgart University: <http://icd.uni-stuttgart.de>

DRL Pavillion: <http://www.dezeen.com/2007/11/04/cspace-pavilion-by-alan-dempsey-and-alvin-huang/>

